



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STOCHASTICKÁ ANALÝZA SMYKOVÉHO PORUŠOVÁNÍ ŽELEZOBETONOVÝCH NOSNÍKŮ

STOCHASTIC ANALYSIS OF SHEAR FAILURE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN KUČEK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. DRAHOMÍR NOVÁK, DrSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Martin Kucek
Název	Stochastická analýza smykového porušování železobetonových nosníků
Vedoucí práce	prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Sborníky konferencí IABMAS, ICOSSAR a ICASP za posledních cca 5 roků.

ATENA - User's and Theory Guides, Červenka Consulting, 2013.

FREET - User's and Theory Guides, Brno/Červenka Consulting, V 1.5, 2015.

SARA - User's and Theory Guides, Červenka Consulting, 2013.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Téma je zaměřeno na výpočet životnosti železobetonových mostních nosníků na základě stochastického modelování. Využívat se bude MKP software nelineární lomové mechaniky ATENA 2D - v tomto bodě práce navazuje na bakalářskou práci. Bude však modelována podrobněji degradace (karbonatace betonu, vliv chloridů, koroze výztuže) pomocí vhodných empirických modelů na základě software FREET-D. Podstatným rozšířením ve srovnání s bakalářskou prací bude virtuální numerická simulace náhodné únosnosti pomocí software SARA. Cílem je modelovat pokles únosnosti v čase, a to na stochastické úrovni. Předpokládá se rovněž ocenění normových předpisů na základě plně pravděpodobnostního přístupu. Práce bude realizována ve spolupráci s praxí a to v rámci projektu TAČR.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práca je zameraná na riešenie odozvy na zaťaženie mostnej konštrukcie z nosníkov KA-73. K riešeniu odozvy na zaťaženie sú použité návrhové metódy nelineárnej analýzy pomocou konečných prvkov na stochastickej a deterministickej úrovni. V rámci stochastickej analýzy je použitá simulačná technika Latin Hypercube Sampling. S predpokladaným poklesom životnosti konštrukcie je riešená degradácia materiálu v podobe korózie výstuže. Záver práce je zameraný na vyhodnotenie citlivosti vstupných veličín materiálových parametrov na odozvu konštrukcie v podobe citlivostnej analýzy.

Abstract

The diploma thesis is focused on a solution of the load reaction of the bridge construction from girders KA-73. Proposal methods of the nonlinear analysis by means of final elements on the stochastic and deterministic level are used for the solution of the load reaction. A simulation technique Latin Hypercube Sampling is used within the stochastic analysis. A material degradation in the form of the trussing corrosion is solved with the expected decrease of the construction lifetime. The conclusion of the thesis contains an evaluation of initial quantities of material parameters for the load reaction of the construction in the form of the sensitivity analysis.

Kľúčové slová

stochastická analýza, nelineárna analýza, návrhové metódy nelineárnej analýzy, korózia, karbonatácia betónu, prienik chloridových iónov, citlivostná analýza, spoľahlivosť, index spoľahlivosti, nosník KA-73

Keywords

stochastic analysis, nonlinear analysis, design method of nonlinear analysis, steel corrosion, carbonation of concrete, ingress of chloride ions, sensitivity analysis, reliability, reliability index, beam KA-73

Citácia

KUCEK, Martin. *Stochastická analýza smykového porušování železobetonových nosníků*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.

Stochastická analýza smykového porušování železobetonových nosníků

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením pána prof. Ing. Drahomíra Nováka, DrSC. a že som uviedol všetky použité informačné zdroje.

.....

Martin Kucek
13. januára 2017

Stochastická analýza smykového porušování železobetonových nosníků

Podakovanie

Na tomto mieste by som chcel poďakovať vedúcemu práce pánovi prof. Ing. Drahomíru Novákovi, DrSc. za odborné vedenie a priateľský prístup počas tvorby tejto práce. Pánovi Ing. Jiřímu Doleželovi, za pomoc pri odladení výpočtového modelu. Nakoniec by som chcel poďakovať svojej rodine a priateľom, ktorí mi poskytovali morálnu podporu počas celého štúdia.

Obsah

1	Úvod	6
1.1	Motivácia	8
2	Spôľahlivosť existujúcich konštrukcií	9
2.1	Teória spoľahlivosti	9
2.2	Návrhové metódy nelineárnej analýzy	11
2.2.1	Plne pravdepodobnostná metóda (Fully probabilistic)	11
2.2.2	Metóda odhadu variačného koeficientu (ECOV)	11
2.2.3	Metóda čiastočných súčiniteľov bezpečnosti (Partial Safety Factor)	12
2.2.4	Metóda globálneho súčiniteľa podľa ČSN EN 1992-2	12
2.3	Popis degradačných procesov	13
2.3.1	Karbonatácia betónu	14
2.3.2	Priemik chloridovej vrstvy	15
2.3.3	Korózia výstuže	16
2.4	Citlivostná analýza	17
2.4.1	Citlivosť vo forme variačných koeficientov	18
2.4.2	Neparametrická poradová korelácia	18
3	Popis výpočtového modelu	20
3.1	Všeobecný popis nosníka KA-73	20
3.2	Experimentálne údaje	21
3.2.1	Základné materiálové charakteristiky	22
3.2.2	Chemický rozbor betónu	23
3.3	Výpočtový model nosníka KA-73	24
3.3.1	Geometria	24
3.3.2	Výstuž	25
3.3.3	Materiály	27
3.3.4	Okrajové podmienky a zaťažovacie stavy	28
3.3.5	Výsledky nelineárneho výpočtu	28
4	Štúdia návrhových metód nelineárnej analýzy	30
4.1	Plne pravdepodobnostná metóda	30
4.2	Metóda odhadu variačného koeficientu (ECOV)	34
4.3	Metóda čiastočných súčiniteľov bezpečnosti (PSF)	35
4.4	Metóda podľa ČSN EN 1992-2	37
4.5	Zhrnutie výsledkov návrhových metód	37

5	Analýza degradácie nosníka KA-73	39
5.1	Degradácia materiálu vplyvom karbonatácie	39
5.2	Degradácia materiálu vplyvom prieniku chloridových iónov	41
5.3	Modelovanie korózie výstuže	43
5.4	Vplyv degradácie na únosnosť nosníka KA-73	44
6	Výsledky citlivostnej analýzy	49
6.1	Citlivosť vo forme variačných koeficientov	49
6.2	Neparametrická poradová korelácia	51
7	Záver	53
	Literatúra	55

Zoznam obrázkov

2.1	Odpor konštrukcie R a účinok zaťaženia E - Náhodné veličiny [11]	10
2.2	Stanovenie <i>indexu spoľahlivosti</i> β [11]	10
2.3	Priebeh iniciačného času t_i a propagačného času t_p [19]	14
2.4	Rovnomerná korózia (vľavo) a jamková korózia (vpravo) [19]	17
3.1	Priečny rez nosníkom KA-73 [3]	20
3.2	Ľavý most ev.č. D2-055 cez kanál a lesnú cestu za obcou Lanžhot [17] . . .	21
3.3	Pozdĺžny rez nosníka KA-73 (uvedené kóty sú v cm) [8]	24
3.4	Priečny rez nosníka KA-73 (vľavo) a aproximovaný prierez (vpravo), (uvedené kóty sú v cm) [8]	25
3.5	Umiestnenie predpätých káblov (uvedené kóty sú v cm) [8]	26
3.6	Prúty predpätej výstuže	26
3.7	Prúty betonárskej výstuže	26
3.8	LD-Diagram v závislosti zaťaženie - priehyb pre model s rozptýlenou šmykovou výstužou	29
4.1	Priebeh simulácií z programového prostredia SARA	32
4.2	Vizualizácia výsledkov z programu IO-Support	33
4.3	Diagram v závislosti zaťaženie - priehyb pre stredné X_m a charakteristické X_k hodnoty materiálových parametrov	35
4.4	Hodnota ohybového momentu $M_{u,d}$	35
4.5	Diagram v závislosti zaťaženie - priehyb pre návrhové hodnoty X_k materiálových parametrov	36
4.6	Hodnota ohybového momentu $M_{u,d}$	37
4.7	Hodnota ohybového momentu $M_{u,d}$ a zaťažiteľnosti $R_{u,d}$	38
5.1	Parametrická štúdia priebehu karbonatácie v softvéri FReET-D	40
5.2	Parametrická štúdia prieniku chloridových iónov v softvéri FReET-D . . .	42
5.3	Parametrická štúdia priebehu korózie v softvéri FReET-D	43
5.4	Priebeh poklesu strednej hodnoty ohybového momentu na medzi <i>dekompresie</i> pre metódu Fully probabilistic	46
5.5	Priebeh poklesu strednej hodnoty ohybového momentu na medzi <i>únosnosti</i> pre metódu Fully probabilistic	47
5.6	Porovnanie poklesu hodnoty momentu na medzi únosnosti pre všetky návrhové metódy nelineárnej analýzy	48
6.1	Percentuálny podiel jednotlivých variačných koeficientov COV_{X_i}	50
6.2	Percentuálny podiel jednotlivých variačných koeficientov COV_{X_i}	50
6.3	Citlivosť jednotlivých vstupných veličín	51

6.4	Citlivost jednotlivých vstupných veličín	52
-----	--	----

Zoznam tabuliek

3.1	Tabuľka statických a dimenzačných veličín	21
3.2	Výsledné orientačné pevnosti betónu konštrukcie [17]	22
3.3	Výsledky a vyhodnotenia NDT skúšok betónu, most ev.č. D2-055 Lanžhot [17]	22
3.4	Hĺbky karbonatácie nosníkov KA-73	23
3.5	Chemický rozbor betónu nosnej konštrukcie [17]	24
3.6	Prierezové charakteristiky skutočného a aproximovaného prierezu nosníka KA-73	25
3.7	Prúťová výstuž modelovaná v programe ATENA 2D - Predpätá výstuž	25
3.8	Prúťová výstuž modelovaná v programe ATENA 2D - Betonárska výstuž	26
3.9	Materiálové charakteristiky pre materiálový model betónu [8]	27
3.10	Materiálové charakteristiky pre materiálový model predpätej výstuže [8]	27
3.11	Hodnoty momentov, únosnosti a priehybu pre MSD, MST, MSU [8]	29
4.1	Pravdepodobnostné modely materiálových parametrov nosníka KA-73	31
4.2	Štatistická korelácia medzi parametrami betónu [1]	31
4.3	Pravdepodobnostný model predpätých síl	31
4.4	Pravdepodobnostné modely únosnosti nosníka KA-73	32
4.5	Návrhové hodnoty únosnosti $M_{dek,d}$, $M_{u,d}$ a $R_{a,d}$ nosníka KA-73	33
4.6	Charakteristické hodnoty materiálových parametrov	34
4.7	Návrhové hodnoty materiálových parametrov	36
4.8	Porovnanie hodnôt ohybových momentov nosníka KA-73	37
5.1	Definícia vstupných veličín pre modelovanie degradácie, model <i>Carb6</i>	39
5.2	Hodnoty hĺbky karbonatácie x_c v čase t [roky]	40
5.3	Definícia vstupných veličín pre modelovanie degradácie, model <i>Chlor1a</i>	41
5.4	Hodnoty hĺbky prieniku chloridových iónov x_{cl} v čase t [roky]	42
5.5	Definícia vstupných veličín pre modelovanie korózie výstuže, model <i>Corr1</i>	43
5.6	Hodnoty poklesu priemeru výstuže v čase	44
5.7	Stochastické parametre plochy výstuže	45
5.8	Prehľad priebehu návrhových hodnôt ohybových momentov na medzi <i>dekom-</i> <i>presie</i> v čase	46
5.9	Prehľad poklesu návrhových hodnôt ohybových momentov na medzi <i>únos-</i> <i>nosti</i> v čase	47
5.10	Prehľad poklesu návrhových hodnôt zatažiteľnosti v čase	47
6.1	Variačné koeficienty COV_{X_i} pre 16 simulácii v ATENA 2D	49
6.2	Variačné koeficienty COV_{X_i} pre 16 simulácii v ATENA 2D	50
6.3	Citlivosť jednotlivých vstupných veličín	51

Kapitola 1

Úvod

S narastajúcimi nárokmi na dopravnú infraštruktúru, ktorej nenahraditeľnou súčasťou sú už existujúce mostné konštrukcie, sa zvyšuje výskyt mostných konštrukcií ktoré sú svojim vekom a stavom vhodné na rekonštrukciu. V súčasnosti sa nachádza na českých a slovenských cestách približne 3790 mostov, ktoré sú v zlom až havarijnom stave s potrebou rekonštrukcie [16, 4]. V súvislosti s tým sa vynára otázka ako dané mosty rekonštruovať čo najefektívnejším spôsobom. Je potrebné určiť priority v rekonštrukcií s ohľadom na čo najefektívnejšie čerpanie finančných prostriedkov.

K určení čo najpresnejšieho stavu spoľahlivosti konštrukcie nám slúžia rôzne výpočtové metódy. V minulosti sa používali na návrh mostných konštrukcií deterministické metódy, založené na použití čiastkových súčiniteľov. *Metóda dovoľených namáhání* a *metóda stupňa bezpečnosti*.

Metóda dovoľených namáhání je založená na jedinom súčiniteli k . Vychádza z podmienky že namáhanie materiálu σ_{dov} je menšie ako namáhanie materiálu pri porušení σ_{krit} znížené práve o súčiniteľ k , ktorý je volený s ohľadom na neistoty pri určovaní účinkov zaťaženia a odolnosti materiálu. Podmienka spoľahlivosti:

$$\sigma_{max} < \sigma_{dov} \rightarrow \sigma_{dov} = \sigma_{krit}/k$$

Hlavnou nevýhodou tejto metódy je nemožnosť zohľadnenia neistôt jednotlivých základných veličín a neistôt výpočtového modelu pri stanovení zaťaženia a odolnosti konštrukcie. Takzvanú pravdepodobnosť poruchy môžeme u tejto metódy ovplyvniť iba jedinou veličinou, voľbou súčiniteľa k [13].

Metóda stupňa bezpečnosti je založená na výpočte stupňa bezpečnosti s , ktorý by mal byť väčší ako jeho predpísaná hodnota s_0 . Táto metóda sa snaží o lepšie vystihnúť správanie sa prvkov a ich prierezov, pomocou vyjadrenia súhrnných veličín odolnosti prierezu X_{odol} a účinkov zaťaženia X_{zat} . Metóda vychádza s podmienky:

$$s > s_0 \rightarrow s = X_{odol}/X_{zat}$$

Hlavným nedostatkom, podobne ako u metódy dovoľených namáhání, je nemožnosť vyjadriť neistoty vstupných veličín a neistoty výpočtového modelu. Pravdepodobnosť poruchy je možné ovplyvniť zase iba jedinou veličinou a to stupňom bezpečnosti s [13].

V polovici minulého storočia dochádza k masívnemu rozvoju stavebníctva. Začína sa prejavovať snaha o zdokonalenie deterministických metód, ktoré sa stávajú s pohľadu deterministického pojatia vstupných veličín nedostatočné. S tým súvisí pokus o zdokonalenie posudkov spoľahlivosti. Do popredia sa dostáva nová metóda založená na pravdepodobnostnom prístupe k posúdeniu spoľahlivosti : *Metóda medzných stavov*. Posúdenie spoľahlivosti konštrukcie touto metódou spočíva v dvoch častiach, posúdenia medzného stavu únosnosti a medzného stavu použiteľnosti. Táto metóda je založená na porovnaní návrhovej hodnoty maximálneho účinku zaťaženia E_d a návrhovej hodnoty minimálnej odolnosti konštrukcie R_d za pomoci čiastkových súčiniteľov. Vychádza s podmienky spoľahlivosti:

$$\gamma_F * E_k \leq R_k / \gamma_M$$

kde γ_F je čiastkový súčiniteľ vyjadrujúci rozptyl účinkov zaťaženia a γ_M je čiastkový súčiniteľ vyjadrujúci rozptyl odolnosti konštrukcie. Metódu medzných stavov by sme mohli označiť ako metódu polo pravdepodobnostnú. Oproti metóde dovolených namáhání a metóde stupňa bezpečnosti sa počet veličín ovplyvňujúcich pravdepodobnosť poruchy zdvojnásobil. Napriek tomu táto metóda nedáva presnú predstavu o veľkosti rezervy spoľahlivosti a pravdepodobnosti poruchy [13].

V súčasnej dobe sa rozvíjajú a používajú na posúdenie konštrukcií pokročilé metódy stochastickej nelineárnej analýzy, založenej na metóde konečných prvkov (MKP). V porovnaní s deterministickými metódami založenými na použití čiastkových súčiniteľov, poskytujú pravdepodobnostné metódy v kombinácii s nelineárnou analýzou MKP reálnejšie výsledky v chovaní posudzovanej konštrukcie. Reálnejšie výsledky chovania konštrukcie nám poskytujú lepšiu možnosť určenia priorít rekonštrukcie a zároveň čo najefektívnejšie prerozdelenie finančných prostriedkov určených k rekonštrukciám existujúcich konštrukcií[9].

Technika plne pravdepodobnostnej analýzy zavádza nové ukazovatele spoľahlivosti. Sú nimi, pravdepodobnosť poruchy p_f (pravdepodobnosť prekročenia niektorého z medzných stavov) a index spoľahlivosti β . Spoľahlivosť konštrukcie môže byť stanovená so stochasticky zistenej odolnosti konštrukcie a predpokladaného štatisticky rozdeleného zaťaženia. Pravdepodobnostnú odolnosť konštrukcie zistíme opakovaným nelineárnym výpočtom na základe znáhodnenia vstupných veličín. Náhodnosť vstupných veličín zahŕňa neistotu vstupných hodnôt pevností materiálov konštrukcie, poprípade môže zahŕňať aj geometrické nepresnosti konštrukcie. Pre modelovanie je potrebné použitie pokročilých nelineárnych materiálových modelov, ktoré čo najpresnejšie vystihujú chovanie daného materiálu konštrukcie. Vzhľadom k náročnosti nelineárnych výpočtov z časového hľadiska, je potrebné zvoliť pre štatistické spracovanie MKP analýz vhodnú techniku, ktorej postačí k určeniu odhadu bezpečnosti a spoľahlivosti konštrukcie malý počet simulácií. Vzhľadom k časovej náročnosti nelineárnych MKP analýz sa osvedčilo používanie simulačnej metódy Latin Hypercube Sampling (LHS) [9].

Okrem neistôt vstupných hodnôt materiálových parametrov je ďalším výrazne ovplyvňujúcim faktorom životnosti konštrukcie degradácia materiálu. V súvislosti s degradáciou materiálu je potrebné zistiť takzvaný iniciačný čas. Iniciačný čas je časový úsek od zhotovenia konštrukcie až do doby kedy degradačné procesy oslabia kryciu vrstvu výstuže natolko, že výstuž stratí pasívačnú schopnosť a začne korodovať. Hlavnými faktormi ovplyvňujúcimi degradáciu sú pôsobenie karbonatácie a prienik chloridových iónov. S tým súvisí poškodenie

krycej vrstvy a následná korózia výstuže [9].

Celý postup pravdepodobnostnej analýzy založený na nelineárnej analýze MKP v kombinácii so simulačnými technikami typu Monte Carlo by sa dal rozčleniť do nasledujúcich krokov:

- Štatistická analýza nameraných dát
- Matematické modelovanie degradácie
- Deterministická analýza pomocou MKP
- Spoľahlivostná analýza

Táto metodika je spracovaná v programovom systéme SARA (Structural Analysis and Reliability Assessment). Programové prostredie pozostáva so štyroch častí:

- Interaktívne grafické prostredie SARA Studio (zaisťuje správu dát a riadenie súčastí systému)
- Softvér ATENA (nelineárne výpočty pomocou MKP)
- Štatistický a spoľahlivostný program FReET (Feasible Reliable Engineering Tool)
- Integrovaná databáza stochastických parametrov mechanických vlastností stavebných materiálov

Programový systém SARA bol vyvinutý firmou Červenka Consulting, s pomocou ďalších odborníkov pracujúcich v oblasti stavebníctva[14].

1.1 Motivácia

Hlavnou motiváciou k vypracovaniu diplomovej práce bola nadväznosť na bakalársku prácu s názvom *Výpočet životnosti mostnej konštrukcie na základe nelineárnej analýzy a modelovania degradácie*[8]. Cieľom bakalárskej práce bolo zistenie únosnosti danej konštrukcie, ktorou bola mostná konštrukcia diaľničného mostu na diaľnici D2 ev.č. D2-055..2 za obcou Lanžhot. Nosná konštrukcia mostu sa skladala z 13 prefabrikovaných nosníkov KA-73. Skúmaná bola únosnosť jedného prefabrikovaného nosníka KA-73 na deterministickej úrovni. Na výpočet únosnosti bol použitý softvér nelineárnej mechaniky ATENA 2D. Zároveň bola modelovaná degradácia betónu s následnou koróziou výstuže. Avšak modelovanie degradácie bolo spomenuté len okrajovo. Na záver bolo zhotovené porovnanie únosnosti nosníka s typovými podkladmi.

V diplomovej práci bude problematika stanovenia únosnosti rozvinutá o ďalšie deterministické metódy ako aj o stanovenie únosnosti na stochastickej úrovni. Použitý bude softvér SARA Studio, ktorý prepája softvér na nelineárne výpočty ATENA 2D s pravdepodobnostným softvérom FReET. Problematika degradácie bude rozvinutá o podrobnejšie stanovenie iniciačného času s následnou koróziou výstuže. Iniciačný čas bude stanovený na základe karbonatácie a prieniku chloridov betónovou krycou vrstvou. K stanoveniu degradácie s následnou koróziou výstuže budú použité degradačné modely s FReETu-D. Na záver práce bude zhotovené porovnanie výpočtu únosnosti podľa všetkých metód a bude sledovaný pokles únosnosti v čase, na základe degradácie materiálu. Zároveň bude zhotovená citlivostná analýza. Na základe citlivostnej analýzy môžeme určiť ako daný materiál vplýva na únosnosť konštrukcie.

Kapitola 2

Spôľahlivosť existujúcich konštrukcií

2.1 Teória spoľahlivosti

Spôľahlivosť konštrukcie môžeme definovať ako schopnosť objektu plniť požadované funkcie pri zachovaní ukazovateľov bezpečnosti v daných medziach, v požadovanom časovom úseku. Spôľahlivosť konštrukcie je charakterizovaná z hľadiska navrhovania objektu jeho bezporuchovosťou, životnosťou a opraviteľnosťou. Z toho vyplývajú zložky spoľahlivosti: únosnosť (bezpečnosť), použiteľnosť a trvanlivosť.

Podmienka spoľahlivosti môže byť definovaná deterministicky ako aj pravdepodobnostne. Majme dve vzájomne nezávislé veličiny popisujúce účinok zaťaženia E a účinok odolnosti konštrukcie R s hustotami pravdepodobnosti $f_R(r)$ a $f_E(e)$. Základným predpokladom spoľahlivosti je, že účinok maximálneho zaťaženia neprekročí minimálnu hodnotu odolnosti konštrukcie[11].

1. *Deterministicky* definovaná podmienka spoľahlivosti:

$$R_d > E_d \quad (2.1)$$

kde R_d a E_d sú návrhové (deterministické) hodnoty odolnosti konštrukcie R a účinkov zaťaženia E

2. *Pravdepodobnostná* podmienka spoľahlivosti:

$$R - E > 0 \quad (2.2)$$

kde R a E sú náhodné veličiny odolnosti konštrukcie a účinkov zaťaženia

Výraz na ľavej strane nerovnosti sa často označuje ako rezerva spoľahlivosti a je označovaný ako Z . Medzný stav konštrukcie nastane ak:

$$R - E = Z < 0 \quad (2.3)$$

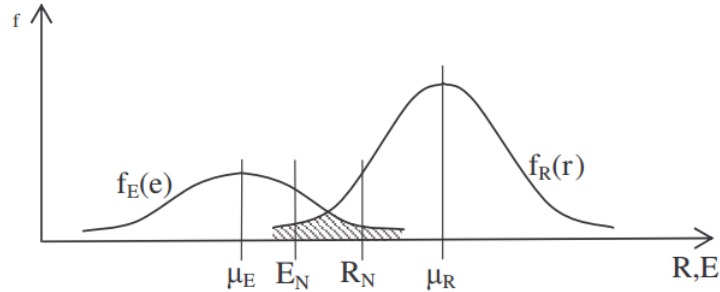
čo môžeme považovať za limitný stav konštrukcie. Náhodná veličina Z je funkcia náhodného vektoru dvoch veličín.

$$Z = g(R, E) = R - E \quad (2.4)$$

Pravdepodobnosť poruchy p_f môžeme definovať ako pravdepodobnosť zápornej rezervy spoľahlivosti.

$$p_f = P(R - E < 0) = P(Z < 0) \quad (2.5)$$

Inak povedané, porucha nastane ak účinok zaťaženia E prekročí hodnotu odolnosti R .

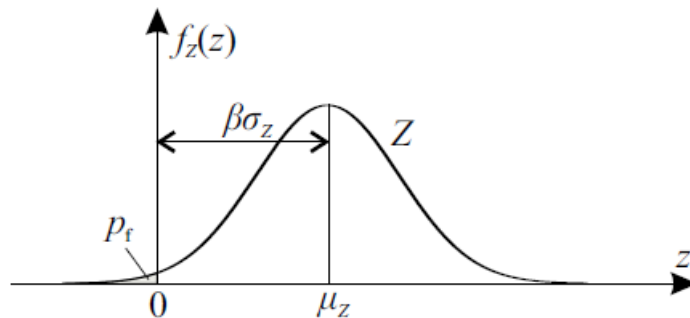


Obr. 2.1: Odpor konštrukcie R a účinok zaťaženia E - Náhodné veličiny [11]

Index spoľahlivosti β je, okrem pravdepodobnosti poruchy, ďalším ukazovateľom spoľahlivosti konštrukcie. Je nutné rozoznávať index spoľahlivosti podľa Cornella [11] a index spoľahlivosti podľa Hasofer a Lindha [11]. Elementárny index spoľahlivosti (podľa Cornella) definujeme pomocou funkcie poruchy Z . Ak sú R a E náhodné veličiny s normálnym rozdelením pravdepodobnosti, tak aj rezerva spoľahlivosti bude definovaná normálnym rozdelením. Potom všetky náhodné veličiny môžu byť popísané iba svojimi strednými hodnotami a smerodajnými odchýlkami. Index spoľahlivosti potom môžeme definovať vzťahom:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (2.6)$$

Teda ako prevrátenú hodnotu variačného koeficientu rezervy spoľahlivosti. Index spoľahlivosti nám hovorí koľkokrát môžeme umiestniť smerodajnú odchýlku rezervy spoľahlivosti medzi nulou a strednú hodnotu.



Obr. 2.2: Stanovenie indexu spoľahlivosti β [11]

2.2 Návrhové metódy nelineárnej analýzy

2.2.1 Plne pravdepodobnostná metóda (Fully probabilistic)

Pri plno pravdepodobnostnej analýze je v prvej fáze dôležité zostavenie a odladenie deterministického výpočtového modelu. V prípade plno pravdepodobnostnej analýzy je vhodné zostaviť výpočtový model v programe ATENA 2D, ktorý spolu s pravdepodobnostným softvérom FReET tvorí spoľahlivý nástroj pre pravdepodobnostnú analýzu. Softvér ATENA slúži k nelineárnym výpočtom železobetónových konštrukcií pomocou metódy konečných prvkov. FReET je viacúčelový pravdepodobnostný softvér pre štatistickú analýzu citlivosti a spoľahlivosti daného problému. Pre zjednodušenie vyhodnotenia pravdepodobnostnej analýzy bol vyvinutý programový softvér SARA. SARA kombinuje nelineárny výpočet programu ATENA 2D s pravdepodobnostnými metódami zahrnutými v programe FReET a degračnými modelmi zahrnutými v programe FReET-D. Spolu tvoria spoľahlivý nástroj pre pravdepodobnostnú analýzu porušovania konštrukcií[14].

K zostaveniu čo najpresnejšieho modelu riešenej konštrukcie je potrebná znalosť materiálových parametrov pre betón (f_{ck} , f_{ct} , G_f ,...) a oceľ (f_y ,...). Dostatočne presné hodnoty sa dajú získať zo štatistického vyhodnotenia diagnostického prieskumu danej konštrukcie ako aj z laboratórnych skúšok. Dôležitým krokom je určenie vhodného materiálového modelu v ATENE 2D pre daný materiál tak aby čo najreálnejšie vystihoval chovanie daného materiálu či už betónu alebo ocele.

Ďalším krokom je znáhodnenie vstupných veličín (materiálové parametre pre betón a oceľ). K tomu nám slúži pravdepodobnostný softvér FReET. Pre znáhodnenie materiálových parametrov je potrebné poznať strednú hodnotu daného parametra a variačný koeficient poprípade smerodajnú odchýlku. Rozdelenie pravdepodobnosti je definované pomocou typu náhodného rozdelenia (distribučnej funkcie). Medzi materiálovými parametrami môže byť zavedená štatistická závislosť, takz. korelačná matica. Korelácia medzi veličinami nám udáva ako sa mení hodnota daného parametra v závislosti na inom parametri[12]. V prípade potreby (na základe Diagnostického prieskumu) môže byť modelovaná degradácia betónu s následnou koróziou výstuže.

Spoľahlivostná analýza je založená na štatistickom vyhodnotení nelineárnej odozvy konštrukcie, získanej opakovaným deterministickým výpočtom realizovaným pre vektor náhodných veličín, generovaný z ich pravdepodobnostných modelov niektorou zo simulačných metód[9]. Ako vhodná metóda sa ukazuje simulovanie podľa Latin Hypercube Sampling (LHS). Pri metóde LHS stačí na vyhodnotenie odozvy konštrukcie malý počet simulácií (rádovo 20-40 simulácií).

Výsledkom plno pravdepodobnostnej metódy je stanovenie návrhovej hodnoty odolnosti R_d konštrukcie pre požadovaný index spoľahlivosti β alebo stanovenie pravdepodobnosti poruchy p_f pre analyzovaný medzný stav.

2.2.2 Metóda odhadu variačného koeficientu (ECOV)

Metóda ECOV[2] je vhodná z hľadiska redukcie počtu simulácií, ktoré sú potrebné pri plno pravdepodobnostnom prístupe. Túto metódu podrobne popisuje vo svojej práci Červenka[5]. V metóde ECOV stačia na určenie odolnosti konštrukcie len dve nelineárne analýzy. Prvá

nelineárna analýza pracuje s charakteristickými hodnotami materiálových parametrov X_k . Výsledkom je charakteristická odolnosť konštrukcie R_k . Druhá analýza pracuje so strednými hodnotami materiálových parametrov X_m . Výstupom je odolnosť R_m . Ďalej sa predpokladá že výsledná odolnosť je opísaná lognormálnym dvojparametrovým rozdelením. Za týchto predpokladov môžeme určiť hodnotu variačného koeficientu ako:

$$V_R = \frac{1}{1,645} \ln \left(\frac{R_m}{R_k} \right) \quad (2.7)$$

Z určeného variačného koeficientu môžeme vyjadriť globálny súčiniteľ spoľahlivosti:

$$\gamma_R = \exp(\alpha_R \beta V_R) \quad (2.8)$$

Kde α_R je citlivostný súčiniteľ a β je index spoľahlivosti podľa ČSN EN 1990. Návrhovú odolnosť konštrukcie potom môžeme určiť ako:

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_R} \quad (2.9)$$

2.2.3 Metóda čiastočných súčiniteľov bezpečnosti (Partial Safety Factor)

V tejto metóde stačí na určenie odolnosti konštrukcie len jeden nelineárny výpočet s návrhovými hodnotami materiálových parametrov X_d . Výsledkom je odolnosť R_d . Návrhové hodnoty sú stanovené pomocou čiastočných súčiniteľov uvedených v norme.

$$R_d = r(f_{c,k}/\gamma_C, f_{y,k}/\gamma_S, \dots) \quad (2.10)$$

Nakoľko sú tieto hodnoty veľmi nízke, predpokladá sa odlišné správanie ako u reálnej konštrukcie. Metóda PSF [2] sa odporúča použiť v prípade neznalosti bližších informácií o vlastnostiach materiálov. Taktiež je veľmi dobre použiteľná pri lineárnych výpočtoch. (cite)

$$R_d = R(f_d) \quad (2.11)$$

2.2.4 Metóda globálneho súčiniteľa podľa ČSN EN 1992-2

Nelineárna analýza podľa ČSN EN 1992-2 [2] sa môže použiť sa predpokladu, že k porušeniu konštrukcie dôjde vplyvom tlaku a ťahová pevnosť betónu nie je použitá ako hlavný činiteľ pre zaťažovací mechanizmus. Výpočet je zhotovený na základe charakteristických hodnôt materiálových parametrov s upravenými hodnotami pre betón a oceľ. Výsledkom je návrhová pevnosť R_d . Pevnosť betónu v tlaku je stanovená z charakteristickej hodnoty f_{ck} pomocou vŕahu:

$$f_{cm} = 0,85 f_{ck} \quad (2.12)$$

Ťahová pevnosť ocele je stanovená z charakteristickej hodnoty f_{yk}

$$f_{ym} = 1,1 f_{yk} \quad (2.13)$$

Výsledná únosnosť je potom stanovená ako:

$$R_d = \frac{R_f}{\gamma_R} \quad (2.14)$$

2.3 Popis degradačných procesov

Životnosť konštrukcie je okrem pevnostných vlastností materiálu popisovaná taktiež trvanlivosťou materiálu. Na materiál okrem pôsobenia zaťaženia pôsobia aj iné vplyvy z prostredia, v ktorom sa nachádzajú. Väčšinou sú to agresívne látky, ktoré môžu reagovať s materiálom konštrukcie a tým danú konštrukciu poškodiť. Tento proces sa nazýva degradácia materiálu[15]. Degradácia, alebo aj korózia materiálu je nezámerné poškodzovanie štruktúry látok. Z toho vyplýva zníženie únosnosti konštrukcie v čase. Podstatné je nie len, v akom prostredí sa konštrukcia nachádza, ale aj spôsob údržby. Údržbou sa myslí napríklad posýpanie soľou v zimnom období, to sa týka hlavne cestných a mostných konštrukcií. Hlavnými faktormi ovplyvňujúcimi degradáciu materiálu sú:

- Fyzikálne faktory – mechanické vplyvy, teplota, vlhkosť
- Chemické faktory- plynne agresívne látky z ovzdušia, roztoky kyselín, zásad a solí, organické látky
- Biologické faktory – mechanické pôsobenie koreňov rastlín, pôsobenie mikroorganizmov

V súvislosti s degradáciou materiálu môžeme definovať pojem životnosť konštrukcie[19]. Životnosť konštrukcie je časový úsek t_S , počas ktorého konštrukcia, alebo jej časť plní svoju funkciu bez porušenia. Životnosť konštrukcie t_S by sa mala pri optimálnom návrhu rovnať návrhovej životnosti t_D . Teda z hľadiska životnosti konštrukcie môžeme konštrukcie posudzovať porovnaním návrhovej životnosti t_D časti, alebo celej konštrukcie s predpokladanou životnosťou t_D :

$$t_S \geq t_D \quad (2.15)$$

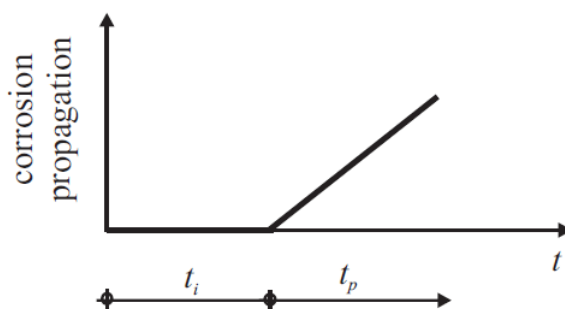
V pravdepodobnostnom pojatí môžeme rovnicu 2.15 zapísať ako:

$$P_f(t_D) = P\{t_S(X_i, t) < t_D\} \leq P_D \quad (2.16)$$

Kde $P_f(t_D)$ je pravdepodobnosť poruchy v čase t_D , P_D je normová hodnota pravdepodobnosti a t_S je predpokladaná životnosť, ktorá je funkciou základných veličín X_i a času t .

V prípade ak je konštrukcia chránená proti degradácií, je možné životnosť určiť ako súčet iniciačného času t_i (doba od postavenia konštrukcie do doby porušenia ochrannej vrstvy výstuže) a propagačného času t_p (časový úsek počas ktorého dochádza ku korózií výstuže) podľa vzťahu:

$$t_S = t_i + t_p \quad (2.17)$$



Obr. 2.3: Priebeh iniciačného času t_i a propagačného času t_p [19]

Pre medzný stav únosnosti môžeme požiadavku na spoľahlivosť zapísať vzťahom:

$$R(t_D) \geq S(t_D) \quad (2.18)$$

Kde $R(t_D)$ je odolnosť konštrukcie, alebo jej časti a $S(t_D)$ je celková degradácia, pričom obidve veličiny sú vyšetrované na konci návrhovej životnosti t_D a sú funkciou základných veličín X_i a času t . Podmienka spoľahlivosti je potom daná ako:

$$P_f(t_D) = P\{R(t_D) - S(t_D) < 0\} \leq P_D \quad (2.19)$$

V tejto práci bude modelovaná degradácia materiálu chemickými vplyvmi, karbonatáciou a prienikom chloridovej vrstvy cez betónovú kryciu vrstvu s následnou koróziou výstuže. Korózia výstuže je pravdepodobne najčastejším typom degradácie železobetónových konštrukcií. Výstuž je chránená tenkou ochrannou vrstvou (pasivačná vrstva), ktorá sa na jej povrchu tvorí vďaka vysokej zásaditosti betónu. Táto vrstva býva porušená prenikaním chloridových iontov alebo karbonatáciou betónu. To má za následok začiatok korodovania výstuže.

2.3.1 Karbonatácia betónu

Karbonatácia betónu je chemický proces, pri ktorom do betónu z okolitého prostredia preniká vzdušný oxid uhličitý CO_2 , čo má za dôsledok zníženie pH betónu na hodnotu menšiu ako 9. Pokles pH je spôsobený rozpúšťaním pevného hydroxidu vápenatého $Ca(OH)_2$ pôsobením vzdušného CO_2 , ktorý prenikol z okolitého prostredia do pórov betónu. Všeobecne teda dochádza k hydratácii cementových materiálov a znižovaniu pórovitosti betónu.

Medzi faktory, ktoré ovplyvňujú karbonatačný proces patrí hlavne difúzia CO_2 a jeho reaktivita s betónom. Prenikanie CO_2 do konštrukcie je ovplyvnené pórovitým systémom zatvrdnutého betónu a prostredím, v ktorom sa konštrukcia nachádza. Prostredie je hlavným ukazovateľom koncentrácie CO_2 v ovzduší a relatívnej vlhkosti. Systém pórov v betóne závisí na type a množstve použitého spojiva, na pomere množstva vody k množstvu spojiva a na stupni hydratácie. Reaktivita betónu s CO_2 je tiež závislá na stupni hydratácie, type a množstve použitého spojiva. Ďalšími faktormi ovplyvňujúcim karbonatáciu betónu sú takzvaný vodný súčiniteľ (pomer množstva vody w k množstvu cementu c), typ cementu, teplota, spôsob ošetrovania betónovej zmesi poprípade prítomnosť trhlín v betónovej zmesi.

Hlavnou podmienkou pri vyhodnocovaní karbonatácie betónu je porovnanie dosiahnutej hĺbky karbonatácie x_c s krycou vrstvou výstuže a . Ak hrúbka vzniknutej karbonatačnej

vrstvy x_c prekoná celú hrúbku betónovej krycej vrstvy a , dochádza k depasivácii výstuže, ktorá môže začať korodovať. Mechanizmus porušovania konštrukcie karbonatáciou sa vyskytuje hlavne v mestských častiach s väčším výskytom CO_2 v ovzduší. Hlavnou úlohou pri modelovaní karbonatácie je stanovenie iniciačného času t_i 2.3.

V tejto práci bude použitý zjednodušený degradačný model karbonatácie *Carb6* z Freetu-D [19]. Karbonatačný model *Carb6* je pomerne jednoduchý model pre predikciu hĺbky karbonatácie vzhľadom na typ cementu. Hĺbka karbonatácie x_c sa dá stanoviť podľa nasledujúceho vzťahu:

$$x_c = \psi 150 \frac{r_{c,6} f(RH) r_{CO_2}}{f_c} \sqrt{t} \quad (2.20)$$

Kde x_c je hĺbka karbonatácie v [mm], pre čas expozície t [roky], f_c je pevnosť betónu v tlaku [MPa], $r_{c,6}$ je koeficient typu cementu[-], $f(RH)$ je vplyv relatívnej vlhkosti[-], r_{CO_2} je koeficient koncentrácie CO_2 [-] a ψ je faktor neistoty[-].

2.3.2 Prienik chloridovej vrstvy

Pri prekročení kritickej hodnoty množstva prenikajúcich chloridov pri povrchu výstuže konštrukcie dochádza k narušeniu ochrannej pasivačnej vrstvy ocele s následnou koróziou výstuže. Chloridy môžu do konštrukcie prenikať v morských pobrežných oblastiach. Taktiež v iných oblastiach môžu do konštrukcie preniknúť napríklad používaním posypových solí v zimnom období. Hladinu chloridov na povrchu výstuže, ktorá má za následok významnú rýchlosť korózie výstuže v betóne môžeme nazvať ako kritickú koncentráciu chloridov. Kritická koncentrácia chloridov sa najčastejšie uvádza ako celkový obsah chloridov pripadajúcich na hmotnosť cementu. Takto reprezentovaná hodnota kritickej koncentrácie má za následok nepresnosti v zistenom rozsahu hodnoty kritickej koncentrácie chloridov a predstavuje celkový potenciál obsahu agresívnych iónov vyjadrených relatívne k celkovému potenciálu inhibítorov. Jedným z dôvodov nepresnosti medzi nameranou hodnotou kritickej koncentrácie chloridov a skutočnosťou je vplyv niekoľkých faktorov ako sú chloridová väzba, mobilita chloridov, vlastnosti cementových spojív (typ spojiva, obsah C3A, pH), vlastnosti betónu (typ cementu, množstvo cementu, pomer w/c , hrúbka krycej vrstvy, spôsob ošetrovania) a vplyv environmentálnych javov. Za hlavný faktor sa pokladá fyzický stav rozhrania na pomedzí betón-ocel. Ďalším dôvodom je rozdiel medzi metódami merania kritickej hodnoty koncentrácie chloridov, obsahu chloridov na povrchu ocele a času počiatku korózie. Počiatok korózie môže byť stanovený rôznymi metódami uvedenými v [19] alebo vizuálnou kontrolou.

Medzný stav depasivácie spôsobený prienikom chloridov môže byť vyhodnotený pomocou porovnania kritickej koncentrácie chloridov C_{cr} s aktuálnou koncentráciou $C(x=a,t)$ v hĺbke krycej vrstvy a v čase t , alebo porovnaním kritického času depasivácie t_{cr} s návrhovou životnosťou konštrukcie t_D . Koncentráciu chloridov môžeme rozdeliť do nasledovných kategórií:

- $< 0,02$ % - nízka koncentrácia (nepravdepodobný vznik korózie)
- $(0,02 - 0,05)$ % - nízka až stredná koncentrácia (možný vznik korózie)
- $(0,05 - 0,15)$ % - stredná až vysoká koncentrácia (pravdepodobný vznik korózie)
- $> 0,15$ % - vysoká koncentrácia (korozívne prostredie)

Pre popis procesu prenikania chloridov do betónu, v závislosti na čase, existuje niekoľko rôznych modelov, z ktorých veľa vychádza z druhého Fickovho zákona difúzie. V tejto práci bude použitý obecný model z Freetu-D *Chlor1a*. Degradačný model *Chlor1a* je definovaný na základe nelineárnej diferenciálnej rovnice, ktorú možno vyčísliť iba numericky. Po zavedení určitých predpokladov môžeme túto rovnicu nahraďiť jednoduchou analytickou aproximáciou, v ktorej je použitých štrnásť vstupných parametrov (čas, koncentrácia chloridov na povrchu betónu, nasýtená koncentrácia chloridov v pevnej fáze betónu, koeficient difúzie, špecifická hmotnosť cementu a kameniva, jednotkové množstvo vody, cementu a kameniva a parameter modelových neistôt). S týchto veličín môžeme určiť hĺbku prieniku chloridovej vrstvy x_{Cl} ako:

$$x_{Cl} = \psi \cdot 1000 \sqrt{\frac{3.1536 \cdot 2D_{e,Cl^-} \cdot C_{S,0}}{C_{sat}}} t \cdot 10^7 \quad (2.21)$$

Ak C_{cr} označuje kritickú koncentráciu chloridov Cl^- vo vodnej fáze betónu [mol/m^3] potrebnej k depasivácii ocelevej tyče ($13,4 \text{ mol}/\text{m}^3$ v prípade $NaCl$), a je hrúbka betónovej krycej vrstvy [mm] a ψ je faktor neistoty modelu [-], potom čas t_i [roky] depasivácie je daný vzťahom:

$$t_i = \psi \frac{C_{sat}(a/1000)^2}{3.1536 \cdot 10^7 \cdot D_{e,Cl^-} \cdot C_{S,0} \left(1 - \frac{C_{cr}}{C_{S,0}}\right)^2} \quad (2.22)$$

Degradačné modely karbonatácie a prieniku chloridovej vrstvy všeobecne slúžia k zisteniu iniciačného času. Po zistení iniciačného času zvlášť pre karbonatačný a chloridový degradačný model, môže byť tento čas použitý ako vstupná hodnota do modelov určených pre modelovanie korózie výstuže.

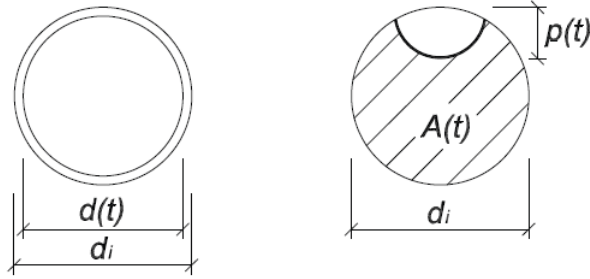
2.3.3 Korózia výstuže

Korózia výstuže je elektrochemický dej, pri ktorom prebiehajú súčasne dve reakcie : anódová a katódová. Voda v póroch plní funkciu elektrolytu takzvaného vodivého prostredia. Koróziou výstuže dochádza k znižovaniu efektívnej plochy výstuže. Paradoxne k tomu predchádza vznik korozívnych produktov, ktoré majú niekoľkonásobne (2-6x) vyšší objem. Zvýšenie objemu výstuže vplyvom korózie vedie k rozvoju ťahového napätia v okolitom betóne, ktoré môže spôsobiť vznik pozdĺžnych trhlin s následným odlupovaním betónovej krycej vrstvy. Modelovanie korózie sa dá rozdeliť do dvoch typov:

- rovnomerná
- nerovnomerná (jamková)

Pri rovnomernej korózií dochádza k rovnomernému úbytku výstuže po celom obvode. Pri jamkovej korózií dochádza k značnému úbytku efektívnej plochy v dôsledku čoho sú prúty výstuže omnoho krehkejšie. Zatiaľ čo k rovnomernej korózií dochádza pôsobením vplyvu karbonatácie, jamková korózia najčastejšie vzniká pri pôsobení chloridov a pri výskyte trhlín v betónovej krycej vrstve, či pri lokálnych poškodeniach povrchu výstuže.

Medzný stav spôsobený koróziou výstuže môže byť dosiahnutý, pokiaľ počiatočný priemer výstuže $d(t_D)$ znížený vplyvom korózie dosiahne alebo sa rovná kritickému priemeru



Obr. 2.4: Rovnomerná korózia (vľavo) a jamková korózia (vpravo) [19]

výstuže d_{cr} . Ďalším ukazovateľom môže byť minimálna prierezová plocha A_{min} , ktorá nesmie byť väčšia ako plocha výstuže $A(t_D)$ znížená vplyvom korózie. Pri jamkovej korózii nesmie prekročiť hĺbka jamky $p(t_D)$ kritickú hĺbku p_{cr} .

Pre modelovanie korózie bude použitý degradačný model s Freetu-D *Corr1*. Degradácia bude modelovaná ako rovnomerný pokles plochy výstuže po celom jej obvode. Priemer výstuže vo vyšetřovanom čase sa dá stanoviť na základe rovnice:

$$d(t) = \begin{cases} d_i & t \leq t_i \\ \psi |d_i - 0,0116 i_{corr} R_{corr} (t - t_i)| & t_i < t \leq t_i + \frac{d_i}{0,0116 i_{corr} R_{corr}} \\ 0 & t > t_i + \frac{d_i}{0,0116 i_{corr} R_{corr}} \end{cases} \quad (2.23)$$

Kde ψ je parameter modelových neistôt [-], d_i je počiatočný priemer výstuže [mm], R_{corr} [-] je parameter, ktorý vyjadruje typ korózie, pre rovnomernú koróziu môžeme uvažovať $R_{corr} = 2$, i_{corr} je prúdová hustota [$\mu A/cm^2$], ktorej stredná hodnota môže byť pre rovnomernú koróziu uvažovaná hodnotou $i_{corr}=1$ alebo môže byť dopočítaná na základe vzťahu:

$$i_{corr} = 0,3686 \ln(t) + 1,1305 \quad (2.24)$$

Vďaka modelovaniu degradácie materiálov podľa degradačných modelov, môžeme stanoviť približný pokles únosnosti danej konštrukcie v čase. Dôležité je čo najpresnejšie určiť iniciačný čas degradácie. Následne musíme posúdiť vplyv degradácie na výstuž a modelovať degradáciu výstuže tak, aby vyčíslený pokles únosnosti odpovedal čo najviac reálnemu chovaniu konštrukcie. Treba podotknúť, že modelovanie degradácie, hlavne dlhodobej, materiálov konštrukcie treba brať s rezervou, pretože počas životnosti konštrukcie sa môže meniť veľa faktorov ovplyvňujúcich životnosť konštrukcie, či už sa jedná o environmentálne vplyvy alebo iné.

2.4 Citlivostná analýza

Popri skúmaní poklesu únosnosti v čase a porovnávaní rôznych výpočtových metód môže byť zaujímavé sledovať akým spôsobom ovplyvňujú dané výsledky hodnoty vstupných parametrov (betón, oceľ...). Pre interpretáciu výsledkov môže byť stanovená citlivosť odozvy

na zmenu vstupných parametrov. K tomu nám slúži takzvaná citlivostná analýza [11]. Môžeme určiť dominantnosť vstupných veličín, ktoré ovplyvňujú výsledný stav konštrukcie. Citlivostnú analýzu môžeme rozdeliť do dvoch hlavných skupín:

- deterministická (návrhová) citlivostná analýza
- stochastická (pravdepodobnostná) citlivostná analýza

Pre účely tejto práce bude použitá citlivostná analýza na stochastickej úrovni. Stochastická citlivostná analýza poskytuje komplexnejšie informácie o vplyve vstupných parametrov. Je však o poznanie zložitejšia ako deterministická citlivostná analýza. K výpočtu citlivosti je potrebné použiť náročnejšie numerické metódy. Vstupné parametre sú uvažované ako náhodné. Sú určené svojim rozdelením pravdepodobnosti s danými štatistickými parametrami – strednou hodnotou, smerodajnou odchýlkou poprípade variačným koeficientom. Existuje veľa rôznych metód stochastickej citlivostnej analýzy, ktoré možno rozdeliť podľa zisťovania vplyvu vstupných náhodných veličín na:

- pravdepodobnosť poruchy
- odozvu konštrukcie

V tejto práci budú použité prístupy spadajúce do druhej skupiny metód, ktoré sú založené na klasických prístupoch k simuláciám. Konkrétne na simulácií typu Monte Carlo alebo Latin Hypercube Sampling.

2.4.1 Citlivosť vo forme variačných koeficientov

Citlivosť odozvy náhodných vstupných parametrov veličín môžeme stanoviť na základe porovnávania variačných koeficientov COV_{X_i} . Zhotovíme numerickú simuláciu za predpokladu kedy iba veličina X_i je uvažovaná ako náhodná. Ostatné veličiny uvažujeme dočasne ako nenáhodné, uvažujeme len s ich strednými hodnotami. Numerickou simuláciou získame štatistický súbor odozvy konštrukcie, z ktorého určíme variačný koeficient COV_{X_1} . Ak uvažujeme postupne náhodne všetky veličiny (pri každej simulácii vždy len jednu), potom výsledný variačný koeficient odozvy COV_R môžeme získať pomocou približného vzťahu, ktorý je založený na sumácii čiastkových variačných koeficientov [11]:

$$COV_R \cong \sqrt{\sum_{i=1}^M (\alpha_i^{COV} COV_{X_i})^2} \quad (2.25)$$

Zo vzťahu je zrejmé, že skutočný vplyv je predstavený hodnotou $COV_{R_i}^2$. Tento absolútny vplyv je ovplyvnený hodnotami variačných koeficientov COV_{X_i} a môžeme ho výhodne reprezentovať v percentuálnom vyjadrení ($COV_R=100\%$). Ukazuje, aký je podiel vplyvu jednotlivých vstupných náhodných veličín na výslednom variačnom koeficiente odozvy konštrukcie.

2.4.2 Neparametrická poradová korelácia

Relatívny vplyv náhodnej vstupnej veličiny na odozvu konštrukcie môžeme tiež určiť na základe čiastočného korelačného koeficientu medzi vstupnou náhodnou veličinou a veličinou odozvy [11]. Metóda je založená na predpoklade, že veličina, ktorá najvýznamnejšie

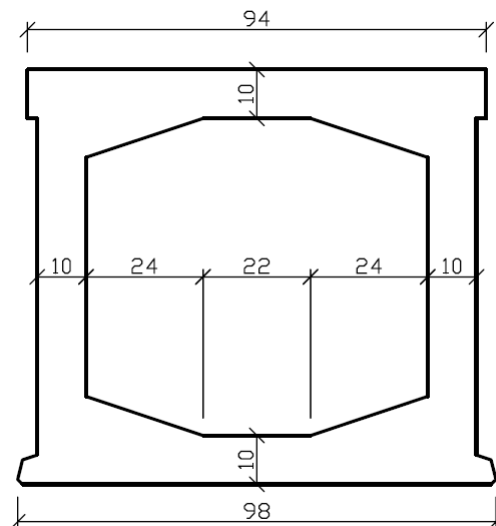
ovplyvňuje odozvu konštrukcie (v pozitívnom alebo negatívnom zmysle), bude mať tento korelačný koeficient väčší v porovnaní s inými náhodnými vstupnými veličinami. V prípade veľmi malého vplyvu sa bude hodnota korelačného koeficientu blížiť k nule, naopak pri veľkom vplyve sa bude hodnota korelačného koeficientu blížiť k 1 alebo -1. Pri tomto spôsobe je možné aplikovať jednoduchú metódu Monte Carlo. Výhodnejšie je použitie dokonalejších metód ako je napríklad metóda Latin Hypercube Sampling. Pre citlivostnú analýzu je potom výhodnejšie použiť neparametrickú poradovú koreláciu, pretože analyzovaný výpočtový model je všeobecne nelineárny a klasický korelačný koeficient je súhlasiaci iba pre veličiny normálne rozdelené. Neparametrická korelácia je viacej robustná v porovnaní s klasickou lineárnou koreláciou, je odolnejšia voči chybám v dátových súboroch a je nezávislá na rozdelení pravdepodobnosti príslušných súborov. Pre účely štatistickej analýzy pomocou neparametrickej poradovej korelácie sa používajú štatistiky ako: *Spearmanov korelačný koeficient* a *Kendallove tau* [11]. Čím väčšia je absolútna hodnota jednej z týchto štatistík, tým významnejšia je citlivosť odozvy na vstupnú náhodnú veličinu X_i .

Kapitola 3

Popis výpočtového modelu

3.1 Všeobecný popis nosníka KA-73

Nosníky KA-73 sa začali vyrábať v roku 1975, kedy vstúpil do platnosti typový podklad *Konštrukcie cestných a diaľničných mostov z prefabrikátov KA-73 dĺžky 9-12-15-18 m* [3]. Nosníky všetkých dĺžok boli uzavretého komorového prierezu. Prierez v spodnej časti nosníka bol rovnakej šírky 98 cm bez ohľadu na dĺžku nosníka. V hornej časti bola šírka premenlivá od 90-94 cm. Dôvodom k premenlivosti šírky v hornej časti nosníka boli prerušované horné výstupky nosníkov v pozdĺžnom smere, za účelom možnosti dokonalejšieho spracovania betónu v škárah ponornými vibrátormi. Hrúbka spodnej a hornej dosky prierezu bola 10 cm. Taktiež stojiny mali hrúbku 10 cm u všetkých typov nosníkov. V rohoch komorového prierezu sú trojuholníkové nábehy 8 x 24 cm. Výška nosníka sa mení podľa typovej dĺžky nosníka od 60-85 cm. Tvar prierezu je po celej dĺžke konštantný okrem koncových častí. Podľa úpravy koncových častí môžeme nosníky KA-73 rozdeliť na tri druhy: nosník druhu „A, B, a C“.



Obr. 3.1: Priečny rez nosníkom KA-73 [3]

Nosníky sa vyrábali dvomi spôsobmi. Mohli byť vyrábané v celku pre všetky typové dĺžky, alebo boli vyrábané v celku pre typovú dĺžku 9 m a pre ostatné dĺžky boli vyrábané z troch dielcov. Ako materiál na výrobu nosníkov sa používal betón B 500 o zaručenej kockovej pevnosti $\kappa_{b28}=50$ MPa. Pre výplň škár sa používal betón B 330 o zaručenej kockovej pevnosti $\kappa_{b28}=33$ MPa. Pre predpätie nosníka sa používal hladký patentový drôt ØP 4,5 mm s medzou pevnosti $\sigma_a = 1650$ MPa a medzou prietlačnosti $\sigma_{0,2} = 1350$ MPa. Na betónársku výstuž sa používala oceľ 10 425 (V) s medzou prietlačnosti 420 MPa. Pre vytvorenie kanálikov na predpätú výstuž sa používali oceľové bezšvové rúry o priemere 32 mm. Statické a dimenzačné veličiny podľa typového podkladu sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke:

Typová dĺžka [m]	l [m]	$J_o [m^4]$	$J_k [m^4]$	$E_b [Mp/m^2]$	$M_{dim} [Mpm]$	$M_\rho [Mpm]$	δ
9	8,40	0,013887	0,024515	3 850 000	41,83	7,03	1,22
12	11,40	0,013943	0,024515	3 850 000	64,48	12,95	1,18
15	14,40	0,020760	0,032914	3 850 000	93,80	22,01	1,15
18	17,40	0,034213	0,046452	3 850 000	131,14	35,09	1,12

Tabuľka 3.1: Tabuľka statických a dimenzačných veličín

Použité symboly: l - Rozpätie nosníka, J_o - Moment zotrvačnosti prierezu jedného nosníka, J_k - Moment zotrvačnosti prierezu v krútení jedného nosníka, E_b - Modul pružnosti betónu B 500 podľa ČSN 73 1251, M_{dim} - Dimenzačný moment od zat. hlavného včítane dyn. účinkov v 1/2, M_ρ - Moment od vlastnej váhy nosníka bez váhy škárového betónu, δ - Dynamický súčiniteľ.

3.2 Experimentálne údaje

Experimentálne údaje k riešenej konštrukcii pochádzajú z diagnostického prieskumu ľavého mosta ev. č. D2-055 cez kanál Hakalovská a cez lesnú cestu v km 56,913 diaľnice D2 za obcou Lanžhot [17]. Diagnostický prieskum bol zhotovený na prelome mesiacov október-november v roku 2009.



Obr. 3.2: Ľavý most ev.č. D2-055 cez kanál a lesnú cestu za obcou Lanžhot [17]

Most bol postavený v roku 1980. Čiastočne sa jedná o monolitickú konštrukciu (podpery s krídlami, koncové steny, stĺpy medzilahých podpier, úložné prahy) a čiastočne prefabrikovanú konštrukciu (nosníky KA-73). Objekt sa skladá z dvoch samostatných mostov – ľavého a pravého s rovnakou konštrukciou. Jedná sa o mostnú konštrukciu o troch poliach s dvomi krajnými a dvomi medzilahými podperami. Vodorovná nosná konštrukcia ľavého mosta pozostáva z trinástich nosníkov KA-73, dĺžky 18 m. Na krajných podperách je uložená na ložiská NGE 125 a na medzilahých podporách ju podopierajú vrubové kĺby. Konce nosníkov KA-73 sú upravené sanačným náterom. Odvodnenie komôr je zabezpečené zhotovením dodatočných vrtov. Výrobnú kvalitu nosníkov môžeme podľa DP [17] z hľadiska rovnosti povrchu a rovnorodosti betónu hodnotiť ako dobrú.

V rámci diagnostického prieskumu boli na moste vykonané nasledujúce skúšky:

- Pevnosť betónu
- Chemický rozbor betónu (stanovenie pH a vodorozpustných solí)
- Zistenie korózie predpätej výstuže
- Pevnosť v ťahu povrchových vrstiev
- Skladba vozovky
- Vizuálna prehliadka s fotodokumentáciou

3.2.1 Základné materiálové charakteristiky

Pevnosť betónu podpier, stĺpov a úložných prahov bola stanovená sklerometrickou metódou, upresnenou zistením pevností na jadrových vrtoch o priemere 100 a 50 mm. Pevnosť betónu nosnej konštrukcie, pozdĺžnych spár medzi jednotlivými nosníkmi, dobetonávky nosníkov a krídiel boli stanovené podľa dnes už neplatnej normy ČSN 73 1303. Pre potreby diagnostiky môžeme uvedené hodnoty brať ako orientačné.

Typ konštrukcie	R_{be}	ČSN 73 1205	ČSN 73 2001	ČSN P ENV 206
nosníky KA	44,6 MPa	B 40	400	C30/40
dobetonávky nosníkov	27,5 MPa	B 25	250	C20/25
krídla	41,9 MPa	B 40	400	C30/40

Tabuľka 3.2: Výsledné orientačné pevnosti betónu konštrukcie [17]

Počet skúšobných miest	42
Počet platných sk. miest	42
Aritmetický priemer pevnosti R_b [MPa]	54,88
Výberová smerodajná odchýlka S_k :	5,69
Reziduálna smerodajná odchýlka S_{rez} :	2,50
Súčiniteľ odhadu 5% kvantilu β_n	1,66
Výberová smerodajná odchýlka S_r :	6,22

Tabuľka 3.3: Výsledky a vyhodnotenia NDT skúšok betónu, most ev.č. D2-055 Lanžhot [17]

Vyhodnotenie NDT skúšok betónu - SCHMIDT N podľa ČSN EN 12504-2 a ČSN 73 1973 je uvedené v tab. 3.3. Pevnosť betónu pozdĺžnych spár nemožno vyhodnotiť. Chemické narušenie betónu pozdĺžnych spár vrátane ich „presolenia“ je veľmi vysoké. Môžeme predpokladať, že v hornej časti konštrukcie bude chemický stav betónu horší ako na spodnej strane.

3.2.2 Chemický rozbor betónu

Hĺbka karbonatácie bola stanovená pomocou indikátorov – sfarbenia fenolftaleínu vo vrtoch a jadrových vývrtoch. Ďalšia metóda spočívala v chemickom rozbere betónového prášku z vrtov vrtaných do rôznych hĺbok.

Stanovenie hĺbky karbonatácie podľa pH testu prebiehalo vo vývrtoch Ø22 mm. Vrtý boli zbavené betónového prášku, ktorý zostal na stenách vrtu počas vrtania. Následne bol aplikovaný roztok fenolftaleínu. V rýchlom časovom slede bola zmeraná reakčná vrstva od povrchu konštrukcie. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené výsledky merania reakčnej vrstvy na nosníkoch KA-73.

Stanovenie hĺbky karbonatácie FF - pH testom	
lokalita	[mm] (od povrchu)
nosníky KA	3-5
	2-4
	3-5
	2-5
	1-2
	1-2
	2-4
	2-5
	2-4
	3-5

Tabuľka 3.4: Hĺbky karbonatácie nosníkov KA-73

Pre chemický rozbor betónu konštrukcie boli odobraté vzorky z hĺbok od povrchu postupne 0-10, 10-20, 20-30 mm. Miesta odberu injektážnej malty z kanálikov predpätej výstuže sú totožné s miestami jej odhalenia kvôli vizuálnej kontrole predpätej výstuže. K presnej lokalizácii výstuže bola použitá magnetická indukčná metóda. Všetky obnažené kanáliky mali dostatočné krytie. Bezšvové rúry boli na povrchu bez stôp korózie. Kanáliky boli vnútri dostatočne zainjektované, po odobratí injektážnej malty a obnažení predpätých drôtov neboli objavené stopy korózie. Stanovenie hodnoty pH a obsahu chloridových iónov bolo zhotovené laboratórne vo vodných výluhoch. Chemický rozbor pre nosnú konštrukciu betónu je zhrnutý v nasledujúcej tabuľke:

miesto	hlbka (mm)	pH	pOH	pCl	%Cl ⁻	c(Cl ⁻)/c(OH ⁻)
nosník č. 3	0-10	10,65	3,35	3,43	0,03	0,84
	0-20	10,95	3,05	3,45	0,03	0,40
	0-30	11,39	2,61	3,56	0,02	0,11
nosník č. 6	0-10	10,85	3,15	2,22	0,43	8,49
	0-20	11,58	2,42	2,59	0,18	0,68
	0-30	11,68	2,32	2,85	0,1	0,29

Tabuľka 3.5: Chemický rozbor betónu nosnej konštrukcie [17]

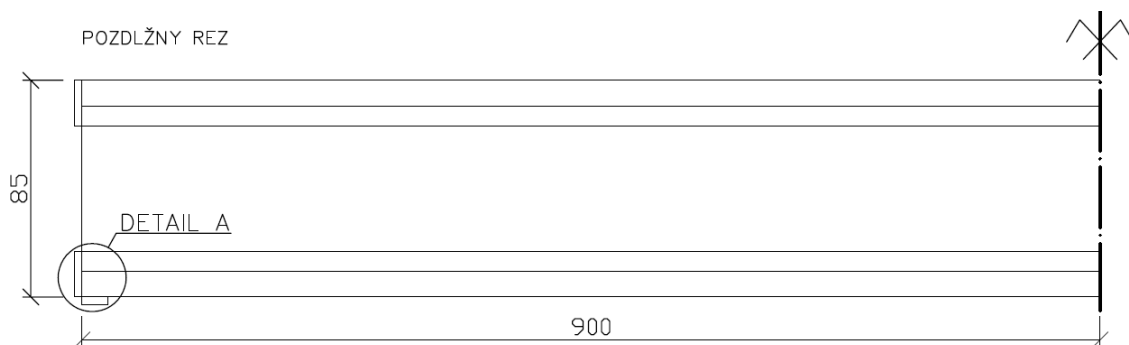
V miestach kde je pomer koncentrácií $c(\text{Cl})/c(\text{OH})$ väčší ako 0,6 nie je už výstuž dostatočne chránená proti korózií.

3.3 Výpočtový model nosníka KA-73

Zhotovenie výpočtového modelu a jeho odladenie bolo predmetom bakalárskej práce – *Výpočet životnosti na základe nelineárnej analýzy a modelovania degradácie* [8]. V nasledujúcej kapitole bude stručne popísaný daný výpočtový model.

3.3.1 Geometria

Bol modelovaný jeden typový nosník KA-73 typu „A“ a dĺžky 18 m. Model bol vytvorený v softvéri nelineárnej mechaniky ATENA 2D [20]. Nosník KA-73 je symetrický podľa osi symetrie v pozdĺžnom smere. Z dôvodu obmedzenia počtu konečných prvkov a urýchlenia výpočtu bola modelovaná len polovica nosníka KA-73 určená osou symetrie v pozdĺžnom smere. V oblasti kotiev predpätej výstuže boli vymodelované betónové podložky z dôvodu eliminácie vzniku trhlín pri zavedení predpätia.

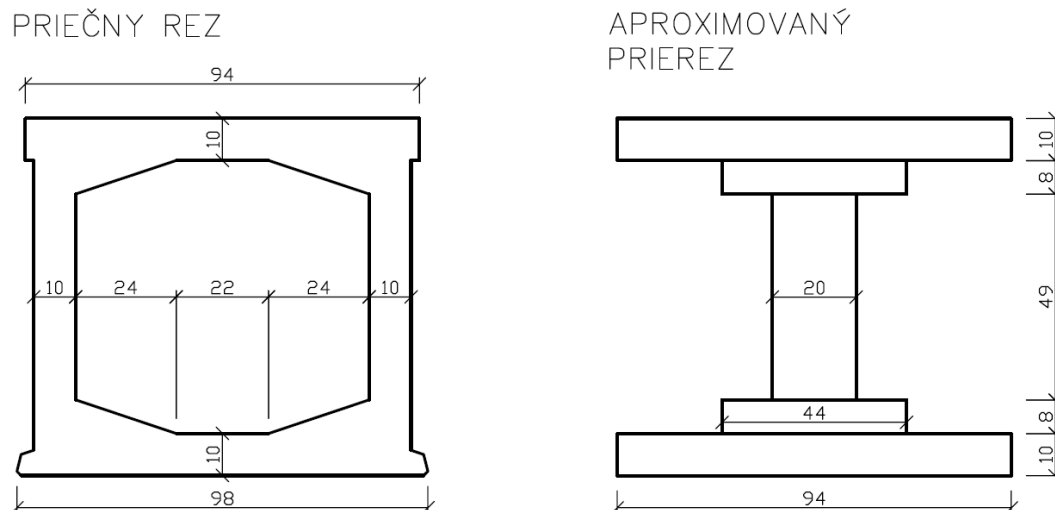


Obr. 3.3: Pozdĺžny rez nosníka KA-73 (uvedené kóty sú v cm) [8]

Pre účely 2D modelu musel byť priestorový komorový prierez nosníka aproximovaný (zjednodušený) do roviny v podobe I prierezu (vid. obr. 3.4), s ohľadom na čo najpresnejšie zachovanie prierezových charakteristík ako je plocha a moment zotrvačnosti daného prierezu. Prierezová plocha A_c a moment zotrvačnosti I_c prierezu nosníka KA-73 ako aj aproximovaného I prierezu sú vyčíslené v tabuľke 3.6. Taktiež bola vyčíslená chyba nepresnosti aproximácie v %.

Veličina	Pr. nosníka KA-73	Aproximovaný I pr.	Chyba Δ %
Prierezová plocha A_c [m^2]	0,3562	0,3564	0,06%
Moment zotrvačnosti I_c [m^4]	0,034213	0,034311	0,3 %

Tabuľka 3.6: Prierezové charakteristiky skutočného a aproximovaného prierezu nosníka KA-73



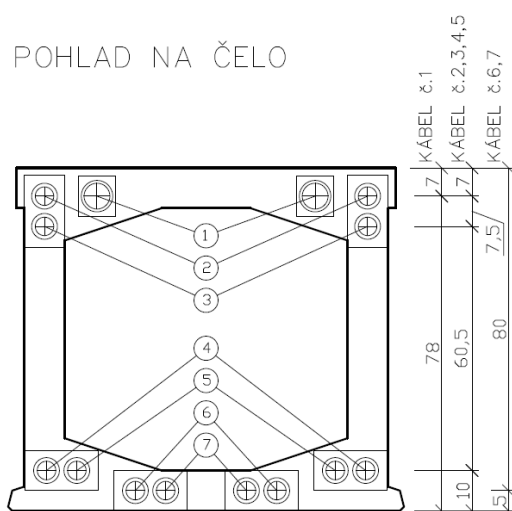
Obr. 3.4: Priechý rez nosníka KA-73 (vľavo) a aproximovaný prierez (vpravo), (uvedené kóty sú v cm) [8]

3.3.2 Výstuž

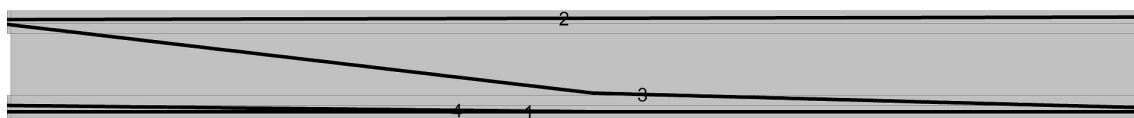
Výstuž bola modelovaná podľa typového podkladu pre prefabrikované nosníky KA-73. V nosníku sa nachádza štrnásť káblov tvoriacich predpätú výstuž (vid. obr. 3.5). V 2D modeli boli predpäté káble vymodelované ako štyri prútové výstuže (vid. tab. 3.7). Okrem predpätej výstuže boli ešte vymodelované dva prúty betonárskej výstuže pri spodnom okraji nosníka pozostávajúce v skutočnosti zo štyroch prútov betonárskej ocele. Šmyková výstuž bola modelovaná ako rozptýlená.

číslo výstuže	Typ výstuže	Priemer drôtu [m]	Počet drôtov	Plocha výstuže A_s [m^2]	č. kábla vid.obr.3.5
1	obyčajná	0,0045	48	7,634E-04	6,7
2	obyčajná	0,0045	12	1.909E-04	1
3	obyčajná	0,0045	48	7,634E-04	2,3
4	obyčajná	0,0045	48	7,634E-04	4,5

Tabuľka 3.7: Prútová výstuž modelovaná v programe ATENA 2D - Predpätá výstuž



Obr. 3.5: Umiestnenie predpätých káblov (uvedené kóty sú v cm) [8]



Obr. 3.6: Prúty predpätej výstuže

číslo výstuže	Typ výstuže	Priemer drôtu [m]	Počet drôtov	Plocha výstuže A_s [m^2]
5	obyčajná	0,01	2	1,571E-04
6	obyčajná	0,01	2	1.571E-04

Tabuľka 3.8: Prúťová výstuž modelovaná v programe ATENA 2D - Betonárska výstuž



Obr. 3.7: Prúty betonárskej výstuže

3.3.3 Materiály

Vďaka zhotovenému diagnostickému prieskumu bolo možné pracovať s reálnymi hodnotami pevností materiálov. Pevnosť betónu pre výpočet bola stanovená svojou strednou hodnotou $f_{c,cube} = 54,88$ MPa. Ako materiálový model bol zvolený *3D Non Linear Cementitious 2* z programu ATENA 2D, ktorý najlepšie vystihuje správanie sa danej konštrukcie. Ďalšie materiálové charakteristiky pre betón boli dopočítané programom ATENA 2D.

Veličina	Hodnota
Modul pružnosti E_{cm}	$3,815E+04$ [MPa]
Poissonovo číslo μ	0,200 [-]
Pevnosť v ťahu f_t	$3,466E+00$ [MPa]
Pevnosť v tlaku f_c	$-4.665E+01$ [MPa]
Špecifická lomová energia G_f	$8.665E-05$ [MN/m]
Kritická tlaková deformácia w_d	$-5,000E-04$ [m]
Excentricita tvaru plochy porušenia e	0,520 [-]
Súčiniteľ smeru plastického tečenia β	0,000 [-]
Špecifická tiaž ρ	$2,300E-02$ [MN/m ³]
Koeficient teplotnej rozťažnosti α	$1,200E-05$ [1/K]
Súčiniteľ fixovaného modelu trhlín	1,00 [-]
Plast. pretvorenie pri tlak. pevnosti Eps CP	$-1,223E-03$ [-]
Redukcia f_c vplyvom trhlín $f_{c,LIM}$	0.8 [-]
Faktor šmyk. pevnosti s_F	20,0 [-]
Veľkosť kameniva	0,0200 [m]

Tabuľka 3.9: Materiálové charakteristiky pre materiálový model betónu [8]

Materiálové charakteristiky pre betonársku oceľ a predpätú výstuž boli uvažované podľa typového podkladu pre nosníky KA-73. Charakteristické hodnoty materiálu predpätej výstuže: medza pevnosti $f_u = 1650$ MPa a medza klzu $f_y = 1325$ MPa boli upravené pomocou vzťahu 3.1 uvedeného v TP 224 [18] na základe zvoleného variačného koeficientu V_x . Kde X_m je stredná a X_k charakteristická hodnota materiálového parametru.

$$X_m = \frac{X_k}{(1 - 2V_x)} \quad (3.1)$$

Po úprave sme dostali stredné hodnoty materiálových charakteristík pre predpätú výstuž, ktoré boli použité pre výpočet v ATENA 2D.

Veličina	Hodnota
Modul pružnosti E_s	$1,950E+05$ [MPa]
Medza klzu f_y	1472,00 [MPa]
Medza pevnosti f_u	1777,00 [MPa]
ϵ_{lim}	0,05 [-]
Špecifická tiaž ρ	$7,850E-02$ [MN/m ³]
Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti α	$1,200E-05$ [-]

Tabuľka 3.10: Materiálové charakteristiky pre materiálový model predpätej výstuže [8]

Charakteristická hodnota medze klzu pre betonársku oceľ $f_{yk} = 425$ MPa bola upravená podľa vzťahu 3.1 a zvoleného variačného koeficientu na hodnotu $f_{ym} = 506$ MPa. Pre model pružnosti sa predpokladala hodnota $E = 210$ GPa. Materiálový model predpätej výstuže bol určený pomocou bi-lineárneho pracovného diagramu so spevnením. Materiálový model betonárskej oceli bol určený pomocou bi-lineárneho diagramu bez spevnenia. Šmyková výstuž bola modelovaná ako rozptýlená. Stupeň vystuženia bol stanovený podľa vzťahu pre určenie stupňa šmykového vystuženia uvedeného v ČSN EN 1992-1-1 [6]. Ostatné materiálové parametre pre šmykovú výstuž boli uvažované rovnako ako aj pre betonársku oceľ.

3.3.4 Okrajové podmienky a zaťažovacie stavy

Nosník bol podopretý v ľavom styčníku bodovou podperou s pevným uložením v smere „y“ a voľným uložením v smere „x“. Na druhej strane nosníka bola umiestnená líniová podpora so zabránením pohybu v smere „x“ a umožnením pohybu v smere „y“. V mieste bodovej podpory bol umiestnený monitorovací bod $M1$, ktorý sledoval nárast reakcie. V mieste líniovej podpory bol umiestnený monitorovací bod $M2$, ktorý sledoval priehyb nosníka v tomto bode (v polovici skutočného rozpätia nosníka). Boli definované štyri zaťažovacie stavy:

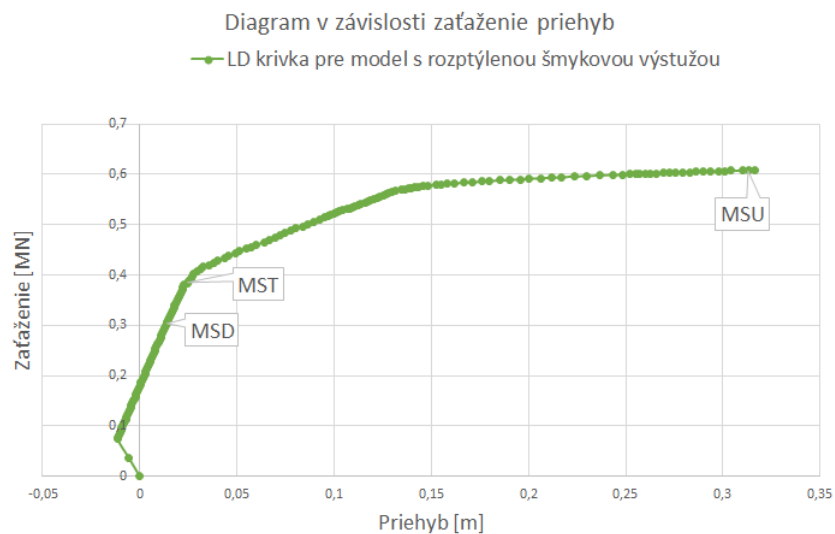
- ZS 1 - Supports
- ZS 2 - Vlastná hmotnosť
- ZS 3 - Zaťaženie predpätím
- ZS 4 - Rovnomerné spojitú zaťaženie (0,5 kN/m)

Samotný nelineárny výpočet bol zhotovený pomocou metódy riešenia Newton-Raphson. Zaťažovanie nosníka prebiehalo nasledovne: v prvých dvoch krokoch výpočtu bola konštrukcia zaťažovaná kombináciou zaťažovacích stavov ZS 1, ZS 2 a ZS 3 s koeficientom kroku 0,5 (z dôvodu predpätia konštrukcie vo výrobe taktiež v dvoch krokoch). V ďalších krokoch bola konštrukcia zaťažovaná prírastkom rovnomerného spojitého zaťaženia až do porušenia konštrukcie.

Predpínacia sila bola stanovená na základe materiálových charakteristík predpätej výstuže a jednotlivých plôch výstuže, ktoré boli modelované v ATENE 2D. Pri výpočte predpínacej sily boli uvažované straty predpätia: krátkodobé 10% a dlhodobé 12,5% [8].

3.3.5 Výsledky nelineárneho výpočtu

Pre nelineárny výpočet boli použité stredné hodnoty materiálových parametrov, stanovené deterministicky. Pre rôzne výpočtové modely bol zhotovený vždy len jeden nelineárny výpočet so strednými hodnotami materiálových parametrov. Vo výsledkoch výpočtu boli sledované ohybové momenty na medzi dekompresie, vzniku trhlín a medzi únosnosti. Ohybový moment na medznom stave dekompresie (MSD) bol stanovený pri nulovej hodnote normálového napätia v dolných vláknach prierezu nosníka. Pri teoretickom vzniku trhlín (MST) bolo normálové napätie v dolných vláknach približne rovné ťahovej pevnosti betónu. Ohybový moment pri medznom stave únosnosti (MSU) bol stanovený pri kolapse konštrukcie. Ďalej bol zhotovený diagram v závislosti zaťaženie – priehyb (LD-Diagram).



Obr. 3.8: LD-Diagram v závislosti zaťaženie - priehyb pre model s rozptýlenou šmykovou výstužou

Medzný stav	Moment v 1/2 [MN/m]	Hodnota reakcie [MN]	Priehyb [m]
MSD	1,357	0,308	0,014
MST	1,671	0,380	0,023
MSU	2,693	0,608	0,310

Tabuľka 3.11: Hodnoty momentov, únosnosti a priehybu pre MSD, MST, MSU [8]

V nasledujúcej kapitole bude nelineárny výpočet rozšírený o ďalšie návrhové metódy nelineárnej analýzy ako sú: metóda *ECOV*, *Partial Safety Factor*, *ČSN EN 1992-2* a plne pravdepodobnostná metóda *Fully Probabilistic* vid. kapitola 2.2.

Kapitola 4

Štúdia návrhových metód nelineárnej analýzy

V nasledujúcej časti diplomovej práce budú uvedené výsledky nelineárnej analýzy získané pomocou vyhodnotenia návrhových metód. Uvedené návrhové metódy sa zakladajú na deterministickom prístupe, ako aj na plne pravdepodobnostnom prístupe. Posúdenie odolnosti konštrukcie za zhotoví na základe vytipovaného konštrukčného prvku, ktorého porušenie by mohlo viesť ku kolapsu konštrukcie. V tomto prípade budeme sledovať odolnosť jedného prefabrikovaného nosníka KA-73 dĺžky 18 m. Nosník je súčasťou ľavého diaľničného mostu ev.č. D2-055. Vďaka zhotovenému diagnostickému prieskumu tohto mostu v roku 2009 (vid. kap. 3.2), bolo možné pracovať s reálnymi hodnotami materiálových parametrov.

4.1 Plne pravdepodobnostná metóda

Stochastická analýza bola zhotovená pomocou programového softvéru SARA Studio, ktorý umožňuje spoluprácu pravdepodobnostného softvéru FReET a softvéru pre nelineárne výpočty ATENA 2D. Ako náhodné veličiny boli určené materiálové parametre betónu (pevnosť v tlaku a ťahu, modul pružnosti, lomová energia a vlastná hmotnosť konštrukcie), predpätej výstuže (medza klzu a únosnosti), betonárskej ocele (medza klzu a modul pružnosti) a rozptýlenej šmykovej výstuže (modul pružnosti a medza klzu). Na základe tlakovej pevnosti betónu boli dopočítané ostatné materiálové charakteristiky pre betón. Charakteristiky predpätej a betonárskej výstuže boli prevzaté z typového podkladu pre nosníky KA-73. Všetky náhodné veličiny boli modelované svojou strednou hodnotou a variačným koeficientom. Variačné koeficienty boli stanovené na základe odporúčaní JCSS [7] a dizertačnej práce Ing. Doležela [1]. Pravdepodobnostné modely náhodných veličín vlastností materiálov sú uvedené v tab. 4.1.

Po stanovení náhodnosti veličín bola medzi niektorými veličinami definovaná štatistická korelácia. Štatistická korelácia medzi jednotlivými parametrami betónu je uvedená v tab. 4.2. Pri betonárskej oceli bola korelácia definovaná medzi ťahovou pevnosťou na medzu klzu a modulom pružnosti ocele hodnotou 1. Ostatné náhodné veličiny boli definované ako nezávislé.

Hodnoty predpätých síl $F_{p,i}$ káblov nosníka KA-73 boli pre výpočet určené tiež ako náhodné. Stredná hodnota predpätej sily bola určená na základe charakteristickej hodnoty medze klzu uvedenej v typovom podklade a plochy výstuže danej zostavy lán vymodelovaných v ATENA 2D (vid. kap. 3.3.2). Pri určení veľkosti daných síl boli predpokladané

i	Veličina	Symbol	Jednotka	PDF	X_m	V_X
<i>Betón nosníka KA-73</i>						
1	modul pružnosti	E_c	[GPa]	LN 2 par.	38,15	0,10
2	pevnosť v ťahu	f_{ct}	[MPa]	LN 2 par.	3,47	0,15
3	pevnosť v tlaku, cyl.	f_c	[MPa]	LN 2 par.	46,65	0,10
4	špec. lomová energia	G_f	[N/m]	LN 2 par.	$8,66 \cdot 10^{-5}$	0,15
5	vlastná hmotnosť	ρ	[kN/m ³]	Normal	23,0	0,03
<i>Predpätá výstuž P4,5 1325/1650</i>						
6	medza klzu	$f_{p,y}$	[MPa]	Normal	1472,0	0,05
7	medza únosnosti	$f_{p,u}$	[MPa]	Normal	1777,0	0,05
<i>Betonárska výstuž 10 425 (V)</i>						
8	modul pružnosti	E_s	[GPa]	Normal	210,0	0,07
9	medza klzu	$f_{s,y}$	[MPa]	LN 2 par.	506,0	0,08

Tabuľka 4.1: Pravdepodobnostné modely materiálových parametrov nosníka KA-73

	E_c	f_{ct}	f_c	G_f
E_c	1	0	0,3	0
f_{ct}	0	1	0,4	0,8
f_c	0,3	0,4	1	0
G_f	0	0,8	0	1

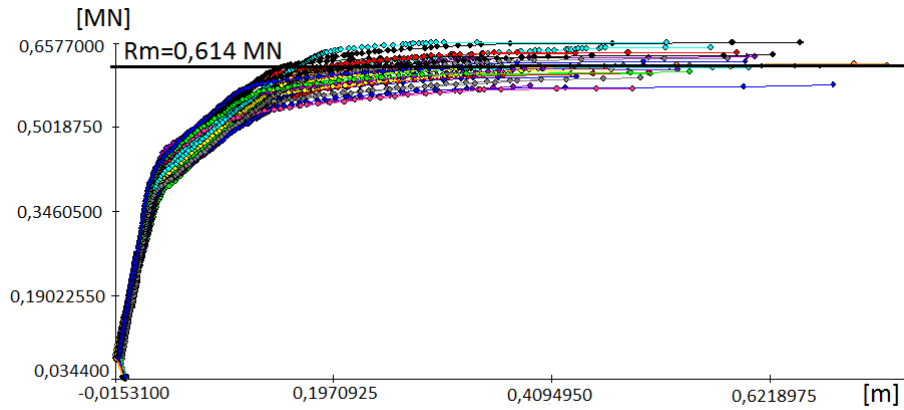
Tabuľka 4.2: Štatistická korelácia medzi parametrami betónu [1]

krátkodobé a dlhodobé straty. Pravdepodobnostný model (rozdelenie distribučnej funkcie a variačný koeficient) bol určený na základe dizertačnej práce [1]. Pravdepodobnostný model predpätých síl je uvedený v tabuľke 4.3 .

i	Veličina	Symbol	Jednotka	PDF	X_m	V_X
<i>Predpätie/ predpätá sila</i>						
1	Kábel 1	$F_{p,1}$	[MN]	Normal	0,195	0,09
2	Kábel 2-3	$F_{p,2}$	[MN]	Normal	0,784	0,09
3	Kábel 4-5	$F_{p,3}$	[MN]	Normal	0,784	0,09
4	Kábel 6-7	$F_{p,4}$	[MN]	Normal	0,784	0,09

Tabuľka 4.3: Pravdepodobnostný model predpätých síl

Na vygenerovanie náhodných simulácií bola použitá simulačná metóda Latin Hypercube Sampling. Z dôvodu časovej náročnosti výpočtu bolo vygenerovaných len 32 simulácií (vid. obr. 4.1), z ktorých sme po výpočte v programe ATENA 2D získali súbor dát (32 hodnôt únosnosti konštrukcie). Súbor dát bol štatisticky vyhodnotený v programe FReET. Pre vizualizáciu výsledkov bol okrem softvéru FReET použitý softvér IO-Support [2].



Obr. 4.1: Pribeh simulácií z programového prostredia SARA

Štatistickým vyhodnotením simulácii bola určená stredná hodnota únosnosti R_m . Zo strednej hodnoty únosnosti R_m bola vyčíslená návrhová hodnota únosnosti R_d . K určeniu návrhovej únosnosti R_d konštrukcie bol použitý podporný softvér určený k vizualizácii výsledkov pravdepodobnostnej analýzy IO-Support [2], ktorý využíva poznatky z teórie matematickej pravdepodobnosti a štatistiky. Únosnosť bola stanovená ako návrhová hodnota ohybového momentu v polovici rozpätia nosníka. Ohybový moment bol určený na medznom stave dekompresie (MSD) a medznom stave únosnosti (MSU). Okrem veľkosti ohybových momentov bola štatisticky vyhodnotená aj veľkosť reakcie, ktorej nárast sledoval monitorovací bod $M1$ umiestnený vo výpočtovom modeli v ATENE 2D (vid. kap. 3.3.4). Pravdepodobnostné hodnoty únosnosti nosníka KA-73 sú uvedené v tab. 4.4.

i	Veličina	Symbol	Jednotka	PDF	X_m	V_X
1	ohybový moment na medzi dekompresie	$M_{R,dek}$	[MNm]	LN 2 par.	1,365	0,05
2	ohybový moment na medzi únosnosti	$M_{R,u}$	[MNm]	LN 2 par.	2,712	0,04
3	reakcia na medzi únosnosti	R_d	[MN]	LN 2 par.	0,614	0,04

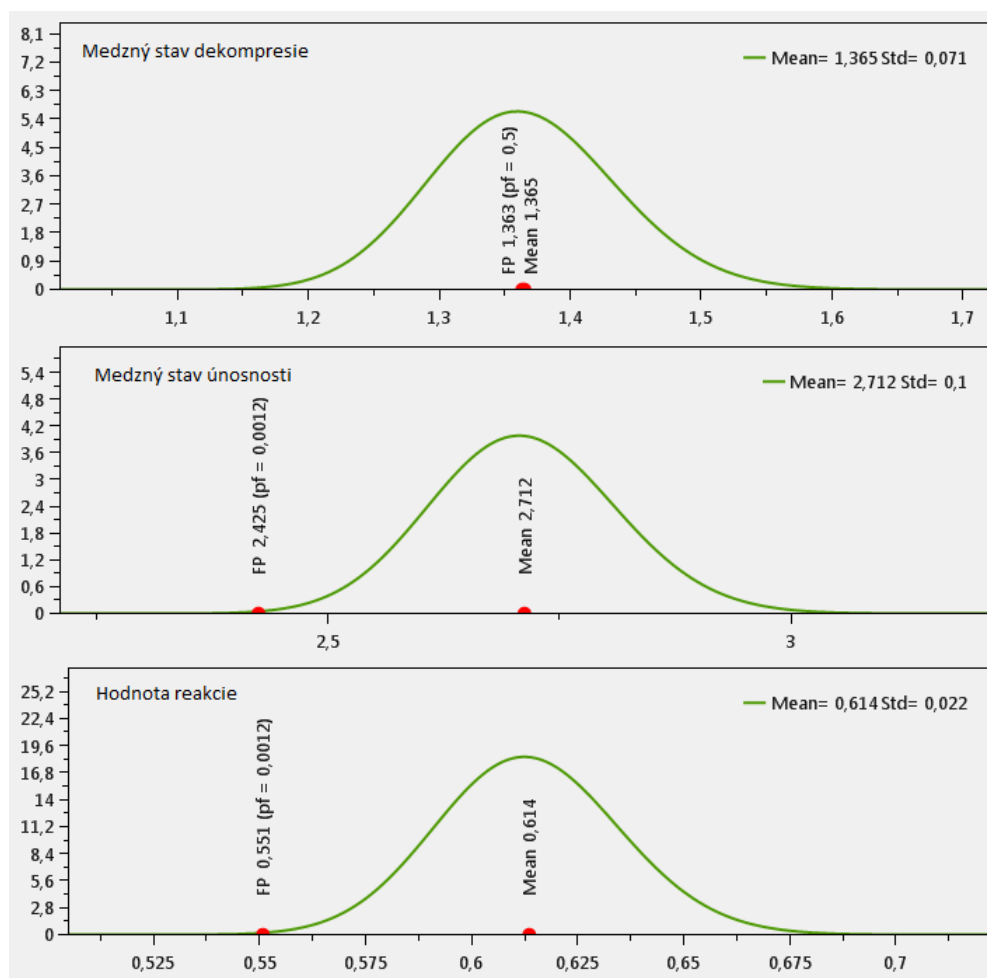
Tabuľka 4.4: Pravdepodobnostné modely únosnosti nosníka KA-73

Určením únosnosti nosníka na základe štatistického vyhodnotenia pravdepodobnostnej analýzy sme spolu so strednou hodnotou získali tiež hodnotu variability únosnosti v podobe variačného koeficienta. Variabilita únosnosti v podobe ohybového momentu na medzi dekompresie bola určená hodnotou 5%. Variabilita únosnosti v podobe ohybového momentu na medzi únosnosti bola určená hodnotou 4%. Pre popis únosnosti sa podľa odporúčaní použije lognormálne 2 par. rozdelenie pravdepodobnosti [1]. Odhad návrhovej hodnoty bol určený na základe poznatku súčiniteľa citlivosti α_R a požadovanej úrovne spoľahlivosti, ktorá je daná hodnotou smerného indexu spoľahlivosti β_t . Pre triedu spoľahlivosti RC2 pre stredné následky poškodenia (zvyčajné typy mostov) pri *medznom stave únosnosti* sa odporúča použiť hodnoty pre $\alpha_R = 0,8$ a $\beta = 3,8$ [18]. *Medzný stav dekompresie* považuje-

jeme z pohľadu medzných stavov použiteľnosti za vratný jav. Môžeme predpokladať, že po odznení náhodného zaťaženia nedôjde k trvalému poškodeniu nosníka. Návrhová hodnota ohybového momentu na medzi dekompresie je určená pre smernú hodnotu indexu spoľahlivosti $\beta_t = 0$ [9]. Určené návrhové hodnoty odolnosti nosníka KA-73 sú zhrnuté v tab. 4.5.

Typ PDF	$M_{dek,d}$ [MNm]	$M_{u,d}$ [MNm]	$R_{a,d}$ [MN]
Lognormálna 2 par.	1,365	2,425	0,551

Tabuľka 4.5: Návrhové hodnoty únosnosti $M_{dek,d}$, $M_{u,d}$ a $R_{a,d}$ nosníka KA-73



Obr. 4.2: Vizualizácia výsledkov z programu IO-Support

4.2 Metóda odhadu variačného koeficientu (ECOV)

Na vyhodnotenie odolnosti nosníka KA-73, v podobe ohybového momentu na medzi únosnosti, podľa metódy ECOV boli potrebné dva nelineárne výpočty v ATENE 2D. Jeden nelineárny výpočet bol zhotovený na základe priemerných materiálových charakteristík uvedených v tab. 4.1. Z neho bola stanovená hodnota ohybového momentu na medzi únosnosti $M_{u,m}$. Druhý nelineárny výpočet bol zhotovený na základe charakteristických materiálových parametrov uvedených v tab. 4.6. Výsledkom bola hodnota ohybového momentu na medzi únosnosti $M_{u,k}$. Charakteristické hodnoty materiálových parametrov potrebné pre výpočet boli stanovené zo stredných hodnôt materiálových parametrov pomocou softvéru IO-Support, ako 5% kvantil z daného teoretického pravdepodobnostného modelu [2].

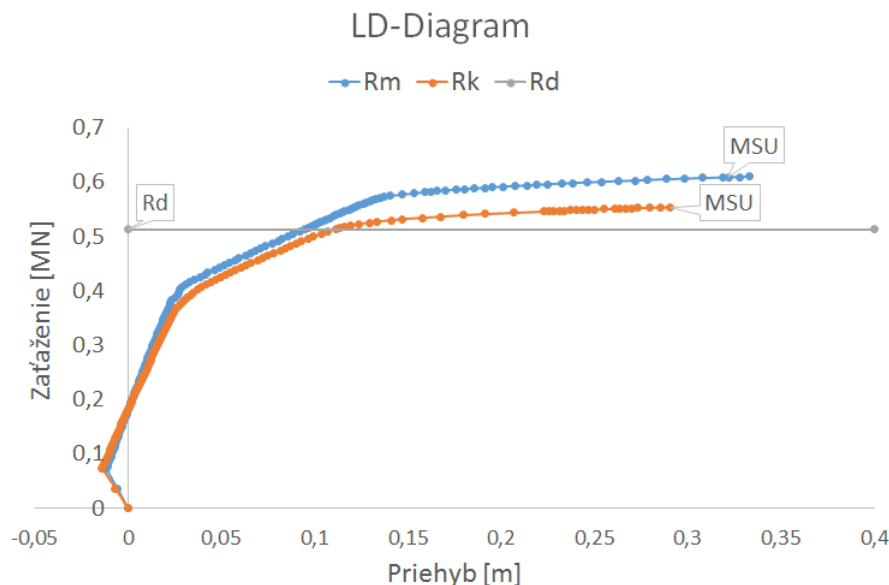
i	Veličina	Symbol	Jednotka	X_m	X_k
<i>Betón nosníka KA-73</i>					
1	modul pružnosti	E_c	[GPa]	38,15	32,4
2	pevnosť v ťahu	f_{ct}	[MPa]	3,47	2,17
3	pevnosť v tlaku, cyl	f_c	[MPa]	46,65	39,6
4	špec. lomová energia	G_f	[N/m]	$8,66 \cdot 10^{-5}$	$6,78 \cdot 10^{-5}$
<i>Predpätá výstuž P4,5 1325/1650</i>					
5	modul pružnosti	E_p	[GPa]	195	185,4
6	medza klzu	$f_{p,y}$	[MPa]	1472,0	1350,9
7	medza únosnosti	$f_{p,u}$	[MPa]	1777,0	1630,8
<i>Betonárska výstuž 10 425 (V)</i>					
8	modul pružnosti	E_s	[GPa]	210,0	186,0
9	medza klzu	$f_{s,y}$	[MPa]	506,0	443,7

Tabuľka 4.6: Charakteristické hodnoty materiálových parametrov

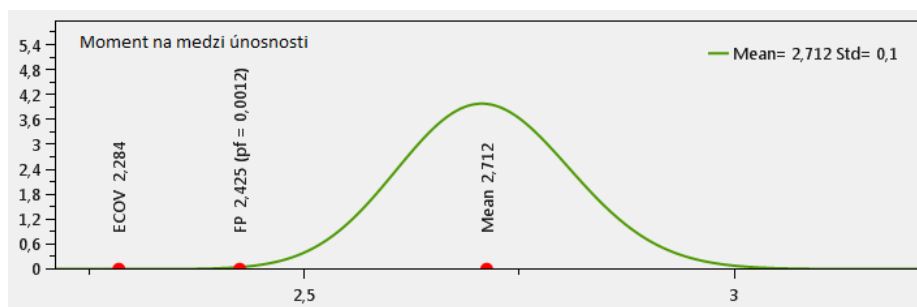
Výsledná hodnota ohybového momentu na medzi únosnosti $M_{u,d}$ bola stanovená zo zistených hodnôt ohybových momentov $M_{u,m}$ a $M_{u,k}$ podľa vzťahu (2.9) a odhadu variačného koeficientu podľa vzťahu (2.7). Z odhadu variačného koeficientu bol určený globálny súčiniteľ odolnosti γ_R podľa vzťahu (2.8) a za predpokladu hodnoty citlivostného súčiniteľa $\alpha_R = 0,8$ a hodnoty indexu spoľahlivosti $\beta_t = 3,8$.

Na obrázku 4.3 sú zobrazené grafy priebehu kriviek v závislosti zaťaženie – priehyb získané z dvoch lineárnych výpočtov potrebných pre metódu ECOV. Krivka R_m bola získaná na základe výpočtu so strednými hodnotami materiálových parametrov. Krivka R_k bola získaná na základe výpočtu s charakteristickými hodnotami materiálových parametrov. Pre ilustráciu bola do grafu vnesená návrhová hodnota únosnosti R_d v podobe podpernej reakcie. Výsledná hodnota odolnosti konštrukcie v podobe ohybového momentu na medzi únosnosti bola podľa predchádzajúcich uvedených výpočtových vzťahov určená na hodnotu $M_{u,d} = 2,284$ MNm.

Na obrázku 4.4 je porovnanie hodnôt ohybových momentov určených podľa metódy ECOV a plne pravdepodobnostnej metódy.



Obr. 4.3: Diagram v závislosti zaťaženie - priehyb pre stredné X_m a charakteristické X_k hodnoty materiálových parametrov



Obr. 4.4: Hodnota ohybového momentu $M_{u,d}$

4.3 Metóda čiastočných súčiniteľov bezpečnosti (PSF)

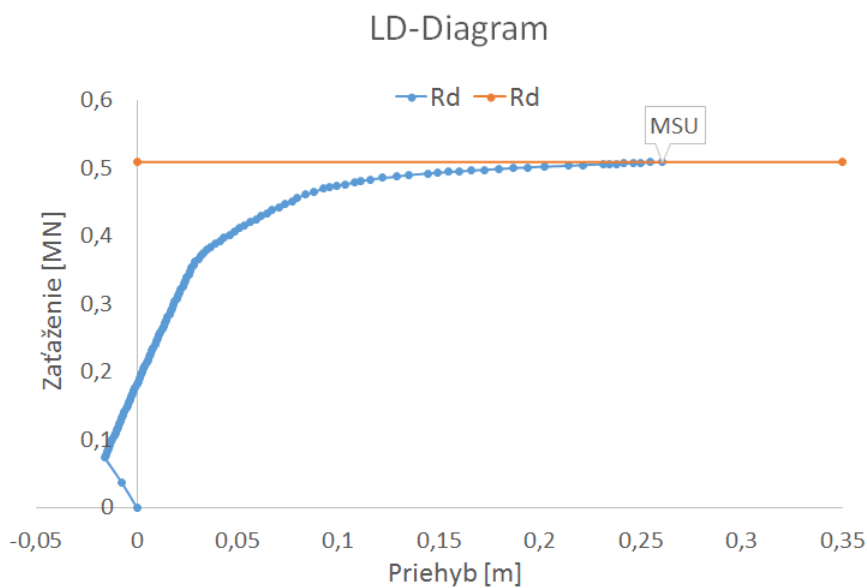
Na určenie odolnosti konštrukcie pomocou metódy PSF je potrebný iba jeden nelineárny výpočet. Výpočet prebieha s návrhovými hodnotami materiálových parametrov. Návrhové hodnoty materiálových parametrov boli stanovené pomocou softvéru IO-Support a odpovedajú kvantilu 0,00118% z teoretického rozdelenia pravdepodobnosti [1], ktorý je stanovený na základe indexu spoľahlivosti $\beta_t = 3,8$. Návrhové hodnoty materiálových parametrov sú uvedené v tabuľke 4.7. Výsledná hodnota návrhovej odolnosti v podobe ohybového momentu na medzi únosnosti bola stanovená podľa vzťahu (2.11).

Obrázok 4.5 zobrazuje graf priebehu krivky v závislosti zaťaženie – priehyb, získanej z výpočtu s návrhovými hodnotami materiálových parametrov. V grafe je vyznačená návrhová zaťažiteľnosť určená podľa metódy PSF. Z návrhovej zaťažiteľnosti bol určený návrhový ohybový moment $M_{u,d} = 2,267$ MNm. Na obrázku 4.6 je zobrazená vizualizácia z programu IO-Support. Môžeme vidieť porovnanie návrhovej hodnoty ohybového momentu

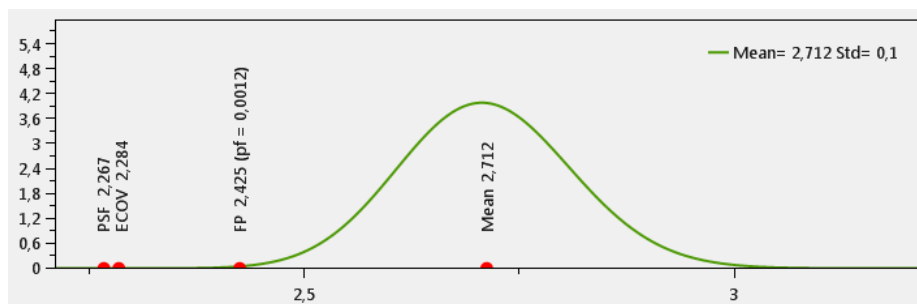
i	Veličina	Symbol	Jednotka	X_m	X_d
<i>Betón nosníka KA-73</i>					
1	modul pružnosti	E_c	[GPa]	38,15	28,2
2	pevnosť v ťahu	f_{ct}	[MPa]	3,47	2,2
3	pevnosť v tlaku, cyl	f_c	[MPa]	46,65	34,5
4	špec. lomová energia	G_f	[N/m]	$8,66 \cdot 10^{-5}$	$5,503 \cdot 10^{-5}$
<i>Predpätá výstuž P4,5 1325/1650</i>					
5	modul pružnosti	E_p	[GPa]	195	177,2
6	medza klzu	$f_{p,y}$	[MPa]	1472,0	1248,2
7	medza únosnosti	$f_{p,u}$	[MPa]	1777,0	1507,0
<i>Betonárska výstuž 10 425 (V)</i>					
8	modul pružnosti	E_s	[GPa]	210,0	165,3
9	medza klzu	$f_{s,y}$	[MPa]	506,0	397,0

Tabuľka 4.7: Návrhové hodnoty materiálových parametrov

$M_{u,d}$ určeného podľa metódy PSF s návrhovými momentami stanovenými podľa metódy ECOV a plne pravdepodobnostnej metódy.



Obr. 4.5: Diagram v závislosti zaťaženie - priehyb pre návrhové hodnoty X_k materiálových parametrov



Obr. 4.6: Hodnota ohybového momentu $M_{u,d}$

4.4 Metóda podľa ČSN EN 1992-2

Pri návrhovej metóde podľa ČSN EN 1992-2 vstupujú do nelineárneho výpočtu charakteristické hodnoty materiálových parametrov s upravenými hodnotami charakteristickej pevnosti betónu v tlaku, podľa vzťahu (2.12) a upravenými charakteristickými hodnotami ťahovej pevnosti ocele, podľa vzťahu (2.13). Ostatné charakteristické hodnoty materiálových parametrov sú uvedené v tabuľke 4.6. Výsledná návrhová hodnota sa potom stanoví podľa vzťahu (2.14). Globálny súčiniteľ bezpečnosti γ_R je uvažovaný hodnotou 1,27. Návrhová hodnota momentu na medzi únosnosti bola vyčíslená na hodnotu $M_{u,d} = 1,917$ MNm. Treba však podotknúť, že metóda podľa ČSN EN 1992-2 je vhodná pokiaľ ide o porušenie konštrukcie vplyvom tlaku. Musíme správne posúdiť, akým spôsobom sa daná koštrukcia poruší na základe čoho môžeme určiť spoľahlivosť metódy podľa ČSN EN 1992-2.

4.5 Zhrnutie výsledkov návrhových metód

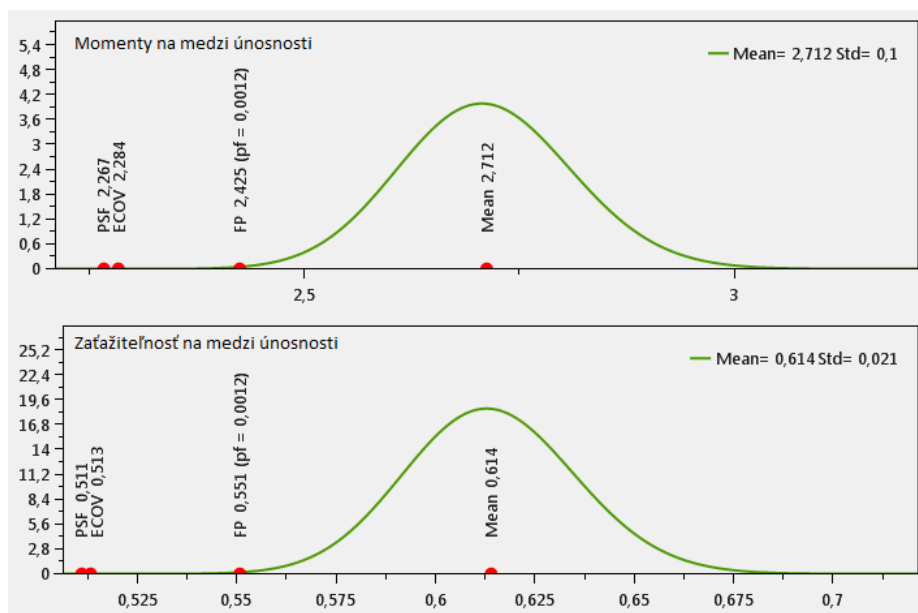
Pre prehľadnú prezentáciu výsledkov sú hodnoty návrhových ohybových momentov $M_{u,d}$ určených na medzi únosnosti pre kritický prierez nosníka KA-73 v polovici rozpätia zhrnuté do tabuľky 4.8. Okrem návrhových hodnôt ohybových momentov na medzi únosnosti je tabuľka doplnená tiež strednými hodnotami ohybových momentov $M_{u,m}$ určených na základe plne pravdepodobnostnej metódy a metódy ECOV. Pre plne pravdepodobnostnú metódu a metódu ECOV je doplnená hodnota variačného koeficientu V_{Mu} . S ohybovými momentami sú v tabuľke uvedené aj návrhové a stredné (pre plne pravdepodobnostnú metódu a metódu ECOV) hodnoty zaťažiteľnosti R_u určené na medznom stave únosnosti.

Metóda	$M_{u,m}$ [MNm]	$M_{u,d}$ [MNm]	V_{Mu} [-]	$R_{u,m}$ [MN]	$R_{u,d}$ [MN]	V_{Ru} [-]
FP	2,712	2,425	0,04	0,614	0,551	0,04
ECOV	2,707	2,284	0,06	0,609	0,513	0,06
PSF	-	2,267	-	-	0,511	-
ČSN EN	2,434	1,917	-	0,546	0,43	-

Tabuľka 4.8: Porovnanie hodnôt ohybových momentov nosníka KA-73

Všetky uvedené hodnoty návrhových metód nelineárnej analýzy boli stanovené v čase 30 rokov od postavenia koštrukcie, kedy bol na koštrukcii zhotovený diagnostický prieskum. Na obrázku 4.7 môžeme vidieť vizualizáciu únosnosti nosníka KA-73 v podobe ohybových

momentov a zaťažiteľnosti pre vek konštrukcie 30 rokov určenej na základe jednotlivých deterministických prístupov v porovnaní s teoretickým pravdepodobnostným modelom. Únosnosť nosníka je stanovená na základe predpokladu lognormálneho 2 par. rozdelenia.



Obr. 4.7: Hodnota ohybového momentu $M_{u,d}$ a zaťažiteľnosti $R_{u,d}$

Kapitola 5

Analýza degradácie nosníka KA-73

Modelovanie degradácie je dôležité z hľadiska trvanlivosti a zostatkovej životnosti danej konštrukcie. Materiál konštrukcie môže degradovať na základe pôsobenia environmentálnych faktorov a na základe intenzity prevádzkového zaťaženia, poprípade vplyvom nesprávnej údržby konštrukcie. Pri správnom určení degradácie materiálu môžeme predísť kolapsu konštrukcie vďaka včasnému rozhodnutiu o pozastavení prevádzky s následnou rekonštrukciou danej konštrukcie. Stav degradácie materiálu môžeme zistiť presne pomocou diagnostického prieskumu, alebo približne, pomocou degradačných modelov z programu FReET-D [19]. FReET-D obsahuje degradačné modely pre degradáciu vplyvom karbonatácie materiálu (betónu) a degradačné modely simulujúce prienik chloridových iónov. Ak je vrstva betónu poškodená vplyvom karbonatácie a prieniku chloridov do úrovne krycej vrstvy betónu, môže dôjsť k poškodeniu pasivačnej vrstvy výstuže a výstuž môže začať korodovať, čo môže výrazne ovplyvniť únosnosť konštrukcie. Modely korózie výstuže sú taktiež obsiahnuté v programe FReET-D. V nasledujúcej kapitole bude analyzovaná degradácia materiálu nosníka KA-73 vplyvom karbonatácie a prieniku chloridovej vrstvy. Následne bude modelovaná korózia výstuže. Výsledky modelovania degradácie materiálu budú porovnané s hodnotami v zhotovenom diagnostickom prieskume [17].

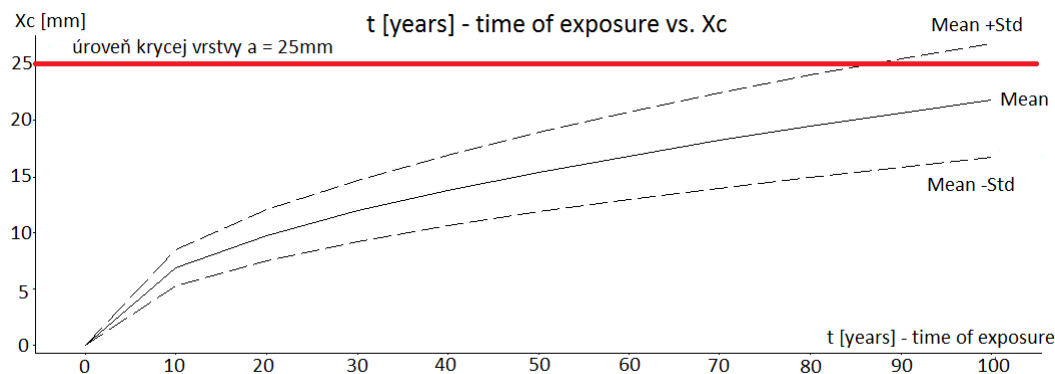
5.1 Degradácia materiálu vplyvom karbonatácie

Karbonatácia betónu vplyvom pôsobenia vzdušného CO_2 z okolitého prostredia do konštrukcie bola modelovaná podľa zjednodušeného degradačného modelu *Carb6*, ktorý je opísaný v kap. 2.3.1. Model *Carb6* bol zvolený na základe článku [9].

i	Veličina	Symbol/Jedn.	PDF	Mean	COV
1	krycia vrstva betónu	a [mm]	Beta	25	0,2
2	roky	t [years]	Deterministické	0-100	
3	koeficient koncentrácie CO_2	r_{CO_2} [-]	Rovnomerné	1,2	0,06
4	relatívna vlhkosť	$f(RH)$ [-]	Rovnomerné	0,7	0,2
5	koeficient typu cementu	$r_{c,6}$	Deterministické	0,8	
6	pevnosť betónu v tlaku	f_c [MPa]	Lognormálne 2 par.	46,65	0,1
7	modelové neistoty	ψ [-]	Deterministické	1	

Tabuľka 5.1: Definícia vstupných veličín pre modelovanie degradácie, model *Carb6*

Stochastické vlastnosti vstupných veličín, teoretické rozdelenie pravdepodobnosti, stredná hodnota a variačný koeficient boli definované podľa hodnôt uvedených vo FReETe-D. Hodnoty vstupných veličín sú opísané v tab 5.1. Hodnota krycej vrstvy výstuže bola prevzatá z typového podkladu pre nosníky KA-73 a pevnosť betónu v tlaku bola určená na základe diagnostického prieskumu. Náhodné veličiny degradačného modelu boli generované pomocou metódy Latin Hypercube Sampling. Pre stanovenie hĺbky karbonatácie x_c bolo vygenerovaných 1000 simulácií. Hĺbka karbonatácie x_c bola stanovená podľa vzťahu (2.20). Priebeh karbonatácie v čase je vyobrazený na obrázku 5.1 a presné hodnoty sú uvedené v tabuľke 5.2.



Obr. 5.1: Parametrická štúdia priebehu karbonatácie v softvéri FReET-D

Hĺbka karbonatácie x_c (roky)	Stredná hodnota [mm]	COV
x_c (10)	6,91	0,232
x_c (20)	9,76	0,232
x_c (30)	11,95	0,232
x_c (40)	13,80	0,232
x_c (50)	15,43	0,232
x_c (60)	16,90	0,232
x_c (70)	18,26	0,232
x_c (80)	19,52	0,232
x_c (90)	20, 70	0,232
x_c (100)	21,82	0,232

Tabuľka 5.2: Hodnoty hĺbky karbonatácie x_c v čase t [roky]

Podľa karbonatačného modelu *Carb6* bolo zistené, že v priebehu návrhovej životnosti konštrukcie (100 rokov) dosiahne hĺbka karbonatácie x_c maximálnu hodnotu 21,82 mm. Z toho môžeme usúdiť, že karbonatácia nebude mať vplyv na pokles únosnosti nosníka KA-73 pri uvážení krycej vrstvy $a = 25$ mm. Priebeh prestupu karbonatačnej vrstvy bol predmetom zisťovania v diagnostickom prieskume. Na základe zistených hodnôt prestupu karbonatačnej vrstvy na nosníkoch KA-73, ktoré sú uvedené v tabuľke 3.4 môžeme porovnať hĺbku karbonatácie na nosníku KA-73 zistenú v diagnostickom prieskume s hodnotami zistenými podľa degradačného modelu *Carb6*. Štatistickým vyhodnotením hĺbok karbona-

tácie zistených v diagnostickom prieskume bola určená stredná hodnota hĺbky karbonatácie pre vek konštrukcie 30 rokov $x_c = 3,1$ mm s variačným koeficientom 6%. V porovnaní s hodnotou stanovenou podľa karbonatačného modelu *Carb6*, pre vek konštrukcie 30 rokov $x_c = 11,9$ mm, môžeme konštatovať, že výsledné hodnoty zistené podľa modelu *Carb6* prevyšujú hodnoty získané na základe diagnostického prieskumu.

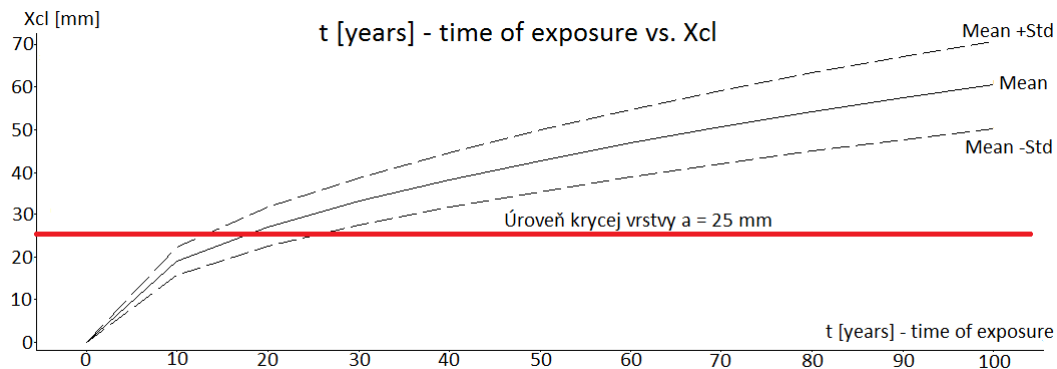
5.2 Degradácia materiálu vplyvom prieniku chloridových iónov

K modelovaniu degradácie materiálu prienikom chloridovej vrstvy do konštrukcie bol použitý degradačný model *Chlor1a* z programu FReET-D. Model *Chlor1a* bol zvolený podobne ako pri karbonatácii podľa článku [9]. Stochastické veličiny daného degradačného modelu sú uvedené v tabuľke 5.3. Veličiny boli určené svojimi predvolenými hodnotami v degradačnom modeli *Chlor1a*.

i	Veličina	Symbol/Jedn.	PDF	Mean	COV
1	krycia vrstva betónu	a [mm]	Lognormálne 2 par.	25	0,2
2	roky	t [years]	Deterministické	0-100	
3	koncentrácia Cl^- na povrchu	$C_{S,0}$	deterministické	154	
4	koncentrácia Cl^- v pevnej fázi	C_{sat}	deterministické	140	
5	kritická koncentrácia Cl^-	C_{cr}	deterministické	13,4	
6	difúzny koeficient	D_{Cl,H_2O}	deterministické	$1,6 \cdot 10^{-9}$	
7	jednotkové mn. vody	w	normálne	183	0,03
8	jednotkové mn. cementu	c	normálne	443	0,03
9	jedn. mn. agregátu 1	a_1	normálne	800	0,03
10	jedn. mn. agregátu 2	a_2	normálne	364	0,03
11	jedn. mn. agregátu 3	a_3	normálne	590	0,03
12	špec. hm. cementu	r_c	normálne	3100	0,02
13	špec. hm. agregátu 1	r_{a1}	normálne	2590	0,02
14	špec. hm. agregátu 2	r_{a2}	normálne	2540	0,02
15	špec. hm. agregátu 3	r_{a3}	normálne	2660	0,02
16	modelové neistoty	ψ	deterministické	1	

Tabuľka 5.3: Definícia vstupných veličín pre modelovanie degradácie, model *Chlor1a*

Bol vygenerovaný rovnaký počet simulácií ako pri modelovaní karbonatácie a výsledný priebeh hĺbky prieniku chloridových iónov bol vyčíslený na základe vzťahu (2.21). Hĺbku prieniku chloridových iónov v závislosti na čase môžeme pozorovať na obrázku 5.2. Presné hodnoty prieniku chloridovej vrstvy pre dané časy sú zobrazené v tabuľke 5.4. Z prezentovaných výsledkov môžeme usúdiť, že degradácia materiálu vplyvom prieniku chloridových iónov do konštrukcie, má výraznejšie väčší vplyv ako degradácia materiálu vplyvom karbonatácie. Z uvedených hodnôt v tabuľke 5.4 môžeme určiť odhad iniciačného času t_i . Odhad iniciačného času bol určený približne v rozmedzí 20 - 30 rokov veku konštrukcie. K urče-



Obr. 5.2: Parametrická štúdia prieniku chloridových iónov v softvéri FReET-D

Hĺbka prieniku chloridových iónov x_c (roky)	Stredná hodnota [mm]	COV
x_{Cl} (10)	19,18	0,168
x_{Cl} (20)	27,13	0,168
x_{Cl} (30)	33,22	0,168
x_{Cl} (40)	38,36	0,168
x_{Cl} (50)	42,89	0,168
x_{Cl} (60)	46,98	0,168
x_{Cl} (70)	50,75	0,168
x_{Cl} (80)	54,25	0,168
x_{Cl} (90)	57,54	0,168
x_{Cl} (100)	60,65	0,168

Tabuľka 5.4: Hodnoty hĺbky prieniku chloridových iónov x_{cl} v čase t [roky]

niu presnejšej hodnoty iniciačného času môžeme použiť ten istý degradačný model ako pri určení hĺbky prieniku chloridovej vrstvy *Chlor1a*. Iniciačný čas bol určený podľa vzťahu (2.22). na hodnotu približne 23 rokov. Výsledky modelovania degradácie prieniku chloridovej vrstvy boli porovnané s hodnotami v diagnostickom prieskume. Diagnostický prieskum zhotovený v dobe 30 rokov veku konštrukcie nepreukázal výraznú mieru degradácie materiálu vplyvom prieniku chloridovej vrstvy, avšak na niektorých miestach nosníka KA-73 presahoval pomer koncentrácií $(Cl^-)/c(OH^-)$ hodnotu 0,6 (vid. tab. 3.5), pri ktorej nie je výstuž dostatočne chránená proti korózii. Preto môžeme konštatovať že, s postupom času by sa mohla kritická koncentrácia $(Cl^-)/c(OH^-)$ rozšíriť na viaceré miesta nosníka KA-73, čo by malo za následok začiatok korózie výstuže. S ohľadom na výsledky modelovania degradácie prienikom chloridovej vrstvy, bude modelovaná korózie výstuže. Iniciačný čas pre začiatok korózie výstuže bol určený na hodnotu 30 rokov od postavenia konštrukcie.

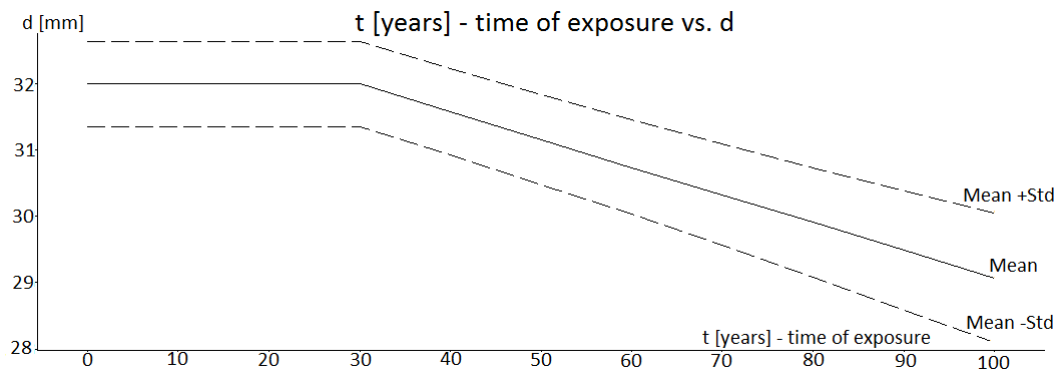
5.3 Modelovanie korózie výstuže

S ohľadom na výsledky modelovania degradácie bola modelovaná následná korózia výstuže. Iniciačný čas straty pasivačnej schopnosti betónu bol určený na 30 rokov od postavenia konštrukcie. Korózia výstuže bola modelovaná podľa degradačného modelu z FReETu-D *Corr1*. Ako vstupné hodnoty pre model *Corr1* boli brané počiatočné priemery výstuže d_i a iniciačný čas t_i . Počiatočné priemery výstuže boli určené na základe typového podkladu pre nosníky KA-73, 32 mm pre predpätú výstuž a 10 mm pre betonársku výstuž. Ostatné hodnoty pre korozívny model *Corr1* boli určené svojimi predvolenými hodnotami. Prehľad vstupných veličín je uvedený v tabuľke 5.5.

i	Veličina	Symbol/Jedn.	PDF	Mean	COV
1	priemer výstuže	d_i [mm]	Deterministické	32; 10	
2	doba korózie	t [years]	Deterministické	0-100	
3	iniciačný čas	t_i [years]	Deterministické	30	
4	prúdová hustota	i_{corr} [$\mu A/cm^2$]	Rovnomerné	1	0,25
5	koefficient typu korózie	R_{corr}	Deterministické	2	
6	modelové neistoty	ψ [-]	Deterministické	1	

Tabuľka 5.5: Definícia vstupných veličín pre modelovanie korózie výstuže, model *Corr1*

Korózia výstuže bola modelovaná rovnomerným poklesom plochy výstuže. V degradačnom modeli *Corr1* bol najskôr zistený pokles priemeru výstuže v čase pre jednotlivé počiatočné priemery výstuže d_i . Z poklesu priemeru bol určený pokles plochy výstuže, ktorá je ešte schopná odolávať zaťaženiu konštrukcie. Pribeh poklesu priemeru výstuže pre $d_i = 32$ mm je zobrazený na obrázku 5.3. Presné hodnoty poklesu priemeru výstuže pre $d_i = 32$ a 10 mm pre jednotlivé časové úseky sú uvedené v tabuľke 5.6.



Obr. 5.3: Parametrická štúdia priebehu korózie v softvéri FReET-D

Percentuálny pokles plochy výstuže bol určený podľa vzťahu LoRA (loss of reinforcement area) [10]. Rozptyl poklesu priemeru výstuže v podobe variačného koeficientu vykazuje malé hodnoty rozptylu pre predpätú výstuž do 4% a pre betonársku výstuž 8-10 %.

$$LoRA = \left(1 - \frac{d(t)^2}{d_i^2} \right) \cdot 100 \quad (5.1)$$

Čas [roky]	Priemer výstuže d_i [mm]	pokles plochy As [%]	COV
30	32	0	-
45	31,37	3,89	0,021
60	30,75	7,68	0,025
75	30,12	11,41	0,026
90	29,49	15,05	0,034
100	29,08	17,43	0,036
30	10	0	-
45	9,37	9,37	0,027
60	8,74	23,61	0,042
75	8,12	34,07	0,062
90	7,49	43,9	0,087
100	7,08	49,87	0,107

Tabuľka 5.6: Hodnoty poklesu priemeru výstuže v čase

Na základe modelovania korózie výstuže upravíme plochy výstuže v programe ATENA 2D.

5.4 Vplyv degradácie na únosnosť nosníka KA-73

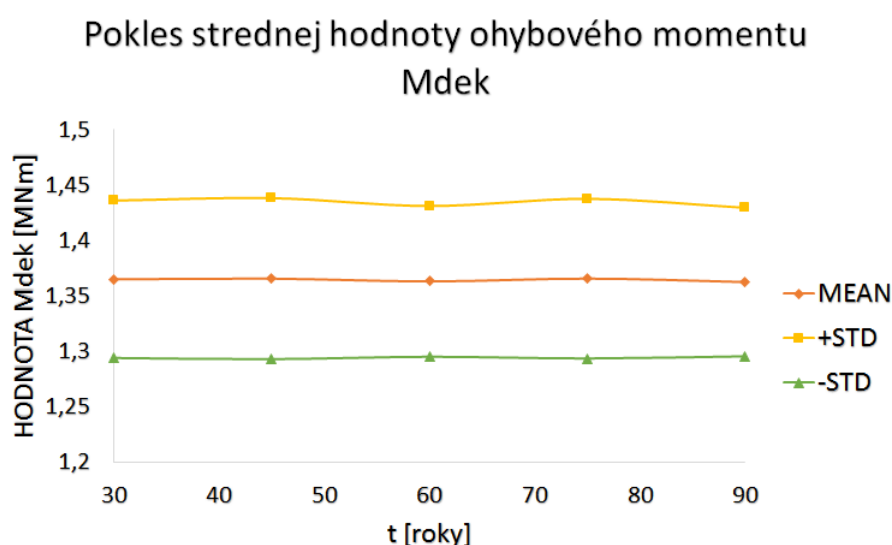
Analýzou degradačných modelov karbonatácie materiálu a prieniku chloridových iónov z FReETu-D sme určili iniciačný čas, po ktorého ubehnutí stratí betón svoju funkciu ochrany výstuže proti korózií. Na základe zisteného iniciačného času bola modelovaná následná korózia výstuže.

Výsledkom modelovania korózie výstuže bolo určenie poklesu efektívnej plochy výstuže nosníka KA-73. Pokles plochy bol sledovaný pre vek konštrukcie 45, 60, 75 a 90 rokov. Pre tieto časové úseky bola určená stredná hodnota plochy výstuže a variačný koeficient. Počiatočné plochy výstuže, ktoré boli oslabované percentuálnym poklesom plochy sú uvedené v tabuľkách 3.7 a 3.8. Stochastické hodnoty plôch výstuže pre jednotlivé časové úseky sú uvedené v tabuľke 5.7. Ratio v tabuľke 5.7 určuje stupeň šmykového vystuženia rozptýlenej šmykovej výstuže. Po určení stochastických parametrov plochy výstuže bolo v programe FReET nasimulovaných 32 simulácií, pre každý časový úsek. Vygenerované hodnoty plôch výstuže pre jednotlivé časové úseky boli doplnené do stochastického modelu nosníka KA-73 a pre každé časové obdobie (45, 60, 75 a 90 rokov) bolo zhotovených 32 nelineárnych výpočtov v programe ATENA 2D. Výsledky nelineárnych výpočtov boli štatisticky vyhodnotené v programe FReET. Štatistickým vyhodnotením výsledkov nelineárnych výpočtov mohol byť sledovaný pokles únosnosti nosníka KA-73. Pokles únosnosti bol určený ako pokles hodnoty ohybových momentov na medzi dekompresie a na medzi únosnosti, tiež bola sledovaná klesajúca zapaľiteľnosť nosníka KA-73. Degradácia s poklesom únosnosti bola skúmaná pre všetky návrhové metódy nelineárnej analýzy (ECOV, PSF, ČSN EN 1992-2, Fully probabilistic).

i	číslo výstuže v ATENE 2D podľa tab. 3.7, 3.8	Symbol	PDF	MEAN [m^4]	COV
<i>Vek konštrukcie 45 rokov</i>					
1	Výstuž 1	$F_{p,1}$	Normal	$7,34 \cdot 10^{-4}$	0,02
2	Výstuž 2	$F_{p,2}$	Normal	$1,83 \cdot 10^{-4}$	0,02
3	Výstuž 3	$F_{p,3}$	Normal	$7,34 \cdot 10^{-4}$	0,02
4	Výstuž 4	$F_{p,4}$	Normal	$7,34 \cdot 10^{-4}$	0,02
5	Výstuž 5	Ø10	Normal	$1,38 \cdot 10^{-4}$	0,03
6	Výstuž 6	Ø10	Normal	$1,38 \cdot 10^{-4}$	0,03
7	Ratio		Normal	0,00689	0,03
<i>Vek konštrukcie 60 rokov</i>					
1	Výstuž 1	$F_{p,1}$	Normal	$7,05 \cdot 10^{-4}$	0,03
2	Výstuž 2	$F_{p,2}$	Normal	$1,76 \cdot 10^{-4}$	0,03
3	Výstuž 3	$F_{p,3}$	Normal	$7,05 \cdot 10^{-4}$	0,03
4	Výstuž 4	$F_{p,4}$	Normal	$7,05 \cdot 10^{-4}$	0,03
5	Výstuž 5	Ø10	Normal	$1,20 \cdot 10^{-4}$	0,04
6	Výstuž 6	Ø10	Normal	$1,20 \cdot 10^{-4}$	0,04
7	Ratio		Normal	0,006	0,04
<i>Vek konštrukcie 75 rokov</i>					
1	Výstuž 1	$F_{p,1}$	Normal	$6,76 \cdot 10^{-4}$	0,03
2	Výstuž 2	$F_{p,2}$	Normal	$1,69 \cdot 10^{-4}$	0,03
3	Výstuž 3	$F_{p,3}$	Normal	$6,76 \cdot 10^{-4}$	0,03
4	Výstuž 4	$F_{p,4}$	Normal	$6,76 \cdot 10^{-4}$	0,03
5	Výstuž 5	Ø10	Normal	$1,04 \cdot 10^{-4}$	0,05
6	Výstuž 6	Ø10	Normal	$1,04 \cdot 10^{-4}$	0,05
7	Ratio		Normal	0,00517	0,05
<i>Vek konštrukcie 90 rokov</i>					
1	Výstuž 1	$F_{p,1}$	Normal	$6,48 \cdot 10^{-4}$	0,03
2	Výstuž 2	$F_{p,2}$	Normal	$1,62 \cdot 10^{-4}$	0,03
3	Výstuž 3	$F_{p,3}$	Normal	$6,48 \cdot 10^{-4}$	0,03
4	Výstuž 4	$F_{p,4}$	Normal	$6,48 \cdot 10^{-4}$	0,03
5	Výstuž 5	Ø10	Normal	$8,81 \cdot 10^{-5}$	0,08
6	Výstuž 6	Ø10	Normal	$8,81 \cdot 10^{-5}$	0,08
7	Ratio		Normal	0,0044	0,08

Tabuľka 5.7: Stochastické parametre plochy výstuže

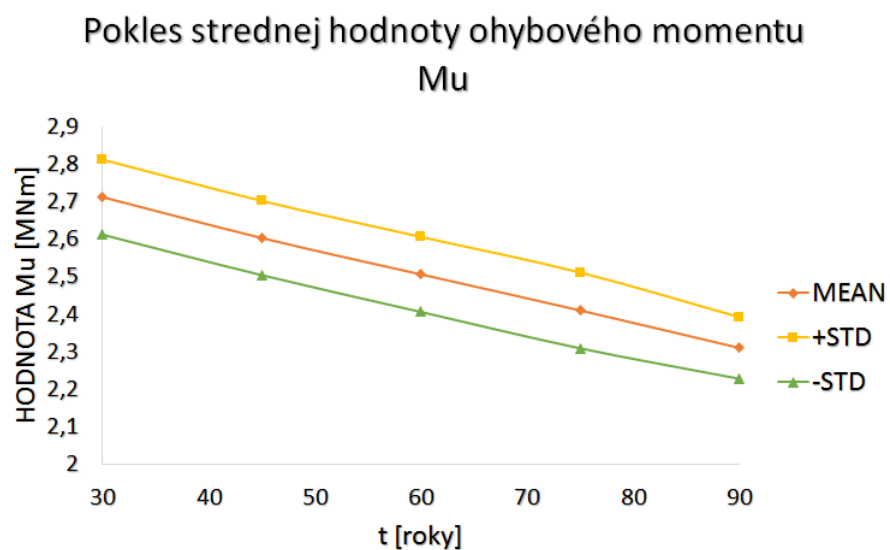
Z analýzy výsledkov boli vyhodnotené nasledujúce závery. Hodnoty ohybového momentu na medzi dekompresie určené pre každý časový úsek sa skoro vôbec nelíšili od hodnoty ohybového momentu na medzi dekompresie určenej pomocou nelineárnej analýzy bez modelovania degradácie. Hodnoty ohybových momentov na medzi dekompresie boli skoro rovnaké pre všetky časové úseky, či už s modelovaním degradácie, alebo bez. Taktiež sa zhodovali hodnoty určené podľa jednotlivých návrhových metód. Variabilita ohybového momentu na medzi dekompresie bola určená variačným koeficientom, pre návrhové metódy ECOV a plne pravdepodobnostnú metódu. Pre všetky časové úseky bola hodnota variability v rozmedzí 4-5%. Dalo by sa konštatovať, že pokles plochy výstuže neovplyvňuje hodnotu ohybového momentu na medzi dekompresie. Priebeh ohybového momentu na medzi dekompresie spolu so smerodajnou odchýlkou je graficky znázornený na obrázku 5.4. Presné hodnoty ohybového momentu na medzi dekompresie pre jednotlivé návrhové metódy a pre jednotlivé časové úseky sú zhrnuté v tabuľke 5.8.



Obr. 5.4: Priebeh poklesu strednej hodnoty ohybového momentu na medzi *dekompresie* pre metódu Fully probabilistic

Metóda/Čas	Moment na medzi dekompresie M_{dek} [MNm]				
	30	45	60	75	90
FP	1,365	1,366	1,363	1,366	1,363
ECOV	1,358	1,357	1,357	1,357	1,357
PSF	1,357	1,357	1,357	1,357	1,357
ČSN EN 1992-2	1,069	1,056	1,056	1,056	1,056

Tabuľka 5.8: Prehľad priebehu návrhových hodnôt ohybových momentov na medzi *dekompresie* v čase



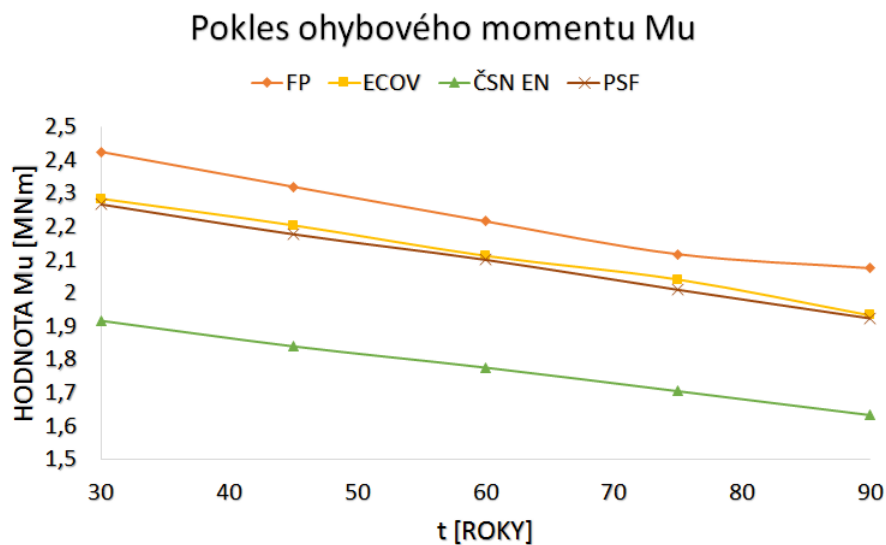
Obr. 5.5: Priebeh poklesu strednej hodnoty ohybového momentu na medzi *únosnosti* pre metódu Fully probabilistic

Metóda/Čas	Moment na medzi únosnosti M_u [MNm]				
	30	45	60	75	90
FP	2,425	2,32	2,216	2,117	2,075
ECOV	2,284	2,204	2,112	2,041	1,933
PSF	2,267	2,177	2,1	2,01	1,924
ČSN EN 1992-2	1,917	1,84	1,776	1,705	1,633

Tabuľka 5.9: Prehľad poklesu návrhových hodnôt ohybových momentov na medzi *únosnosti* v čase

Metóda/Čas	Hodnota zaťažiteľnosti R_u [MN]				
	30	45	60	75	90
FP	0,551	0,525	0,502	0,478	0,470
ECOV	0,513	0,494	0,474	0,456	0,435
PSF	0,511	0,489	0,471	0,453	0,433
ČSN EN 1992-2	0,43	0,413	0,398	0,383	0,367

Tabuľka 5.10: Prehľad poklesu návrhových hodnôt zaťažiteľnosti v čase



Obr. 5.6: Porovnanie poklesu hodnoty momentu na medzi únosnosti pre všetky návrhové metódy nelineárnej analýzy

Na hodnotách návrhového ohybového momentu na medzi únosnosti bolo možné sledovať pokles únosnosti v čase. Únosnosť v podobe ohybových momentov na medzi únosnosti klesala pre jednotlivé časové úseky v rozmedzí 4-6%. Variabilita metódy ECOV a plne pravdepodobnostnej metódy vykazovala, podobne ako pri ohybových momentoch na medzi dekompresie, nízku hodnotu v rozmedzí 4-5%. Pokles strednej hodnoty ohybového momentu na medzi únosnosti spolu s rozptylom únosnosti je graficky znázornený na obrázku 5.5. Presné hodnoty návrhových ohybových momentov na medzi únosnosti pre jednotlivé návrhové metódy a časové úseky sú zhrnuté v tabuľke 5.9. Porovnanie poklesu únosnosti v podobe ohybových momentov na medzi únosnosti pre všetky návrhové metódy je znázornené na obrázku 5.6. V tabuľke 5.10 sú zhrnuté návrhové hodnoty zaťažiteľnosti pre jednotlivé návrhové metódy a pre jednotlivé časové úseky.

Kapitola 6

Výsledky citlivostnej analýzy

K stanoveniu citlivosti odozvy konštrukcie na zmenu veličín materiálových parametrov bola zhotovená citlivostná analýza. Na základe citlivostnej analýzy môžeme určiť aký vplyv na odozvu konštrukcie majú jednotlivé materiály (betón, oceľ...). K určeniu vplyvu zmeny materiálových parametrov bola zhotovená citlivostná analýza v podobe porovnávania variačných koeficientov COV_{X_i} a neparametrická poradová korelácia vyhodnotená programom FReET. Teoretický popis citlivostných metód je uvedený v kap. 2.4.

6.1 Citlivosť vo forme variačných koeficientov

K určeniu citlivosti vstupných veličín podľa variačných koeficientov bolo zhotovených 16 simulácií so zmenou veličín materiálových parametrov vždy len pre jeden materiál. Takzvané bolo zhotovených 16 simulácií kedy bol stochasticky uvažovaný len jeden materiál (betón, oceľ, predpätá výstuž). A 16 simulácií bolo zhotovených kedy boli všetky materiály uvažované ako náhodné. Spolu bolo teda zhotovených 16x4 simulácií. Z každej sady simulácií bol určený jeden variačný koeficient. Pre všetky veličiny uvažované náhodne bol určený variačný koeficient COV_X . Pre ostatné veličiny boli určené postupne variačné koeficienty $COV_{X_1} - COV_{X_3}$. Následne muselo platiť, že odmocnina zo sumy druhých mocnín variačných koeficientov COV_{X_i} sa približne rovná variačnému koeficientu COV_X podľa vzťahu (2.25). Podiel vplyvu jednotlivých vstupných náhodných veličín na výslednom variačnom koeficiente je vhodné prezentovať v percentuálnom zobrazení ($COV_X = 100\%$). Hodnoty jednotlivých variačných koeficientov pre únosnosť a prieťah sú uvedené v tabuľke 6.1 , 6.2. Výsledné percentuálne zobrazenie vplyvu jednotlivých veličín je graficky znázornené na obrázku 6.1, 6.2 . Vplyv jednotlivých veličín materiálových parametrov bol skúmaný na únosnosť a prieťah konštrukcie.

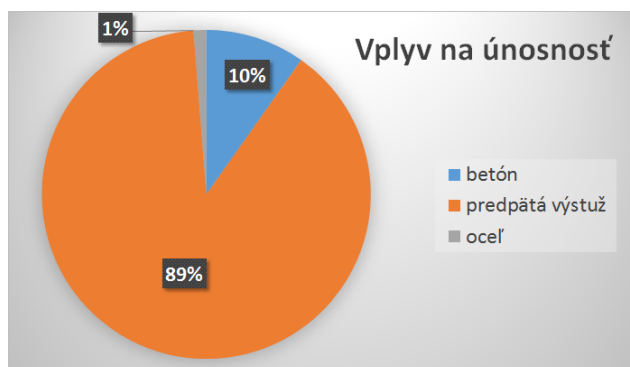
	COV_{X_i} pre únosnosť	
Materiál	COV_{X_i}	$COV_{X_i}^2$
betón	0,011287	0,000127
predpätá výstuž	0,034021	0,001157
oceľ	0,0040198	$1,62 \cdot 10^{-6}$

Tabuľka 6.1: Variačné koeficienty COV_{X_i} pre 16 simulácií v ATENE 2D

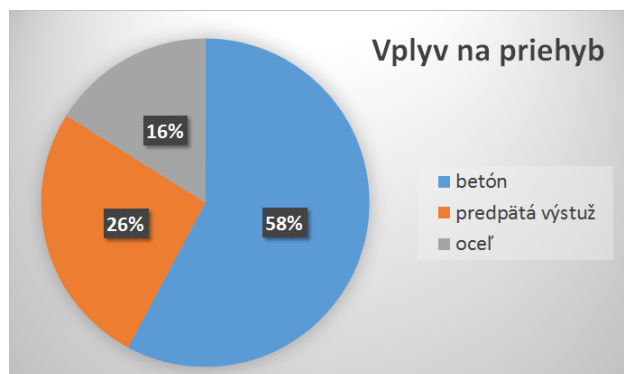
	COV_{X_i} pre priehyb	
Materiál	COV_{X_i}	$COV_{X_i}^2$
betón	0,12622	0,015931
predpätá výstuž	0,084816	0,007194
oceľ	0,066625	0,004439

Tabuľka 6.2: Variačné koeficienty COV_{X_i} pre 16 simulácii v ATENE 2D

Celkový variačný koeficient pre únosnosť bol určený na hodnotu $COV_X = 0,0352$. Suma druhých mocnín jednotlivých variačných koeficientov COV_{X_i} dáva približne rovnakú hodnotu $0,0360 \cong 0,0352$. Na obrázku 6.1 je graficky znázornený podiel jednotlivých variačných koeficientov COV_{X_i} na celkovej hodnote COV_X .



Obr. 6.1: Percentuálny podiel jednotlivých variačných koeficientov COV_{X_i}



Obr. 6.2: Percentuálny podiel jednotlivých variačných koeficientov COV_{X_i}

Celkový variačný koeficient pre priehyb konštrukcie bol určený hodnotou $COV_X = 0,1635 \cong 0,1666$ (suma druhých mocnín jednotlivých variačných koeficientov COV_{X_i}). Na obrázku 6.2 je graficky znázornený podiel jednotlivých variačných koeficientov COV_{X_i} na celkovej hodnote COV_X . Citlivosť vo forme variačných koeficientov ukazuje *absolútny* vplyv jednotlivých veličín materiálových parametrov na odozvu konštrukcie.

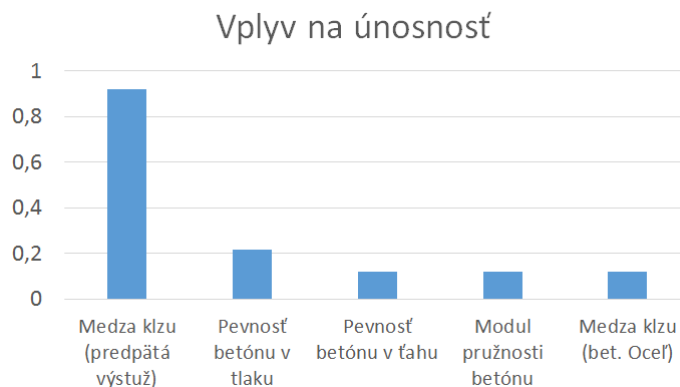
6.2 Neparametrická poradová korelácia

Ako druhá varianta sledovania citlivosti vstupných hodnôt veličín materiálových parametrov na únosnosť a priehyb konštrukcie bola zhotovená neparametrická poradová korelácia. Korelačné koeficienty boli získané štatistickým vyhodnotením 32 simulácií v programe FReET. Kde pre každú simuláciu boli všetky veličiny materiálových parametrov stanovené ako náhodné. O vplyve na odozvu konštrukcie rozhoduje hodnota korelačného koeficientu, ktorá sa pohybuje v rozmedzí -1 až 1. Čím je hodnota bližšia k 1 (-1), tým väčší vplyv má daný parameter na odozvu konštrukcie. Naopak čím je hodnota menšia, tým má daný parameter nižší vplyv na odozvu konštrukcie. Hodnoty korelačných koeficientom boli určené pre vek konštrukcie 30 rokov bez modelovania degradácie, uvedené sú v tabuľke 6.3.

i	Veličina	Symbol	Únosnosť	Priehyb
1	Modul pružnosti betónu	E_c	0,118	0,107
2	Pevnosť betónu v tlaku	f_c	0,215	-0,223
3	Pevnosť betónu v ťahu	f_{ct}	0,121	-0,014
4	Špec. Lomová energia	G_f	0,039	0,091
5	Vlastná hmotnosť betónu	ρ	-0,099	0,178
6	Medza klzu (predpätá výstuž)	$f_{p,y}$	0,919	0,370
7	Medza únosnosti (predpätá výstuž)	$f_{p,u}$	0,094	0,106
8	Modul pružnosti ocele	E_s	-0,035	0,088
9	Medza klzu (bet. Oceľ)	$f_{s,y}$	0,118	0,189
10	Modul pružnosti (šmyková výstuž)	E_s	-0,076	-0,111
11	Medza klzu (šmyková výstuž)	$f_{s,y}$	-0,115	0,146

Tabuľka 6.3: Citlivosť jednotlivých vstupných veličín

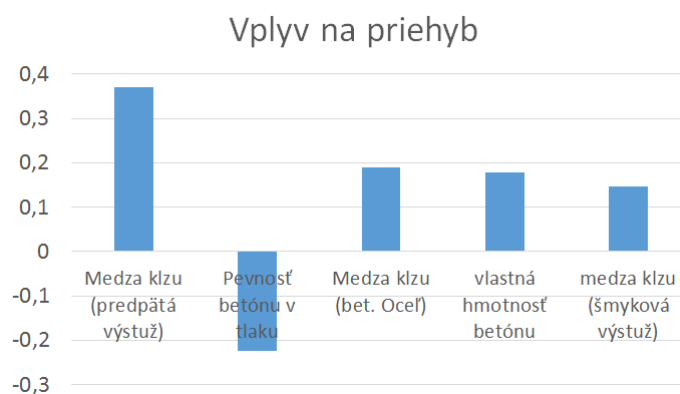
Z uvedených variačných koeficientov môžeme usúdiť, že najväčší vplyv na odozvu konštrukcie v podobe únosnosti má medza klzu predpätej výstuže. Ďalšími materiálovými parametrami, ktoré výraznejšie ovplyvňujú únosnosť sú pevnosť betónu v tlaku a ťahu. Menší vplyv majú medza klzu betonárskej ocele a modul pružnosti betónu. Ostatné parametre by sa dali považovať za zanedbateľné.



Obr. 6.3: Citlivosť jednotlivých vstupných veličín

Na priehyb konštrukcie má najväčší vplyv, podobne ako u únosnosti, medza klzu predpätej výstuže. Ďalšími parametrami, ktoré výraznejšie ovplyvňujú priehyb sú ešte: pevnosť betónu v tlaku, vlastná hmotnosť betónu a medza klzu betonárskej výstuže. Citlivosť v podobe neparametrickej poradovej korelácie ukazuje *relatívny* vplyv veličín materiálových parametrov na odozvu konštrukcie.

Uvedené výsledky neparametrickej poradovej korelácie sú podobné ako výsledky citlivosti podľa variačných koeficientov. Zatiaľ čo na únosnosť má najväčší vplyv predpätá výstuž tak na priehyb majú najväčší vplyv materiálové parametre betónu.



Obr. 6.4: Citlivosť jednotlivých vstupných veličín

Kapitola 7

Záver

Diplomová práca nadväzuje na bakalársku prácu s názvom: *Výpočet životnosti mostnej konštrukcie na základe nelineárnej analýzy a modelovania degradácie*. Predmetom bakalárskej práce bolo odladenie výpočtového modelu v ATENE 2D na základe nelineárnych výpočtov pre tri rôzne modely. Riešenou konštrukciou bol ľavý diaľničný most ev.č. D2-055 cez kanál Hakalovská za obcou Lanžhot. Most bol postavený v roku 1980. V roku 2009 bol na moste zhotovený diagnostický prieskum, vďaka ktorému bolo možné pracovať s reálnymi hodnotami veličín materiálových parametrov. Hlavnú nosnú konštrukciu tvorí trinásť prefabrikovaných nosníkov KA-73. Pre účely modelovania bol použitý jeden typový prefabrikovaný nosník KA-73 dĺžky 18 m. Bola skúmaná odozva nosníka v podobe ohybového momentu na medzi dekompresie a na medzi únosnosti v kritickom priereze nosníka KA-73 v polovici jeho skutočného rozpätia.

Cieľom diplomovej práce bolo vypracovanie stochastického modelu nosníka a zhotovenie rady štúdií návrhových metód, modelovanie degradácie a citlivostnej analýzy.

V diplomovej práci bola problematika bakalárskej práce rozšírená o ďalšie návrhové metódy nelineárnej analýzy založené na deterministickom a plne pravdepodobnostnom prístupe. Konkrétne boli vyhodnotené návrhové metódy založené na deterministickom prístupe: metóda ECOV, metóda Partial Safety Factor, metóda podľa ČSN EN 1992-2 a metódy založené na pravdepodobnostnom prístupe: metóda Fully probabilistic.

K vyhodnoteniu plne pravdepodobnostnej metódy bolo použité programové prostredie SARA Studio, ktoré zaisťuje interakciu medzi programom na nelineárnu analýzu pomocou konečných prvkov ATENA 2D a pravdepodobnostným programom FReET. Výhoda plne pravdepodobnostnej analýzy spočíva v náhodnom pojatí vstupných veličín materiálových parametrov. Na druhej strane je plne pravdepodobnostná metóda časovo veľmi náročná. Platí, že čím viac je zhotovených simulácií, tým dostávame presnejšie výsledky. Vzhľadom k časovej náročnosti je efektívne ku generovaniu simulácií použiť simulačnú metódu Latin Hypercube Sampling. Použitím tejto metódy sa dajú stanoviť veľmi dobré odhady štatistických parametrov odozvy konštrukcie už pri malom počte simulácií. Štatistickým vyhodnotením odozvy konštrukcie dostávame reálne výsledky správania sa konštrukcie. Návrhová hodnota únosnosti je určená na základe teoretického rozdelenia hustoty pravdepodobnosti a na základe hodnoty indexu spoľahlivosti β_t . Je potrebné podotknúť, že teoretické rozdelenie hustoty pravdepodobnosti môže mať na určenie návrhovej hodnoty únosnosti výrazný vplyv.

Odozvy konštrukcie určené podľa metódy ECOV a PSF boli stanovené skoro s rovnakými hodnotami, so zanedbateľným rozdielom. V porovnaní s plne pravdepodobnostnou metódou sa metódy ECOV a PSF javia ako konzervatívnejšie. Určené hodnoty únosnosti

v podobe ohybového momentu na medzi únosnosti podľa metódy ECOV a PSF boli menšie o 6% ako hodnoty ohybového momentu určené plne pravdepodobnostnou metódou. Podľa určenej hodnoty únosnosti metódou ČSN EN 1992-2 môžeme túto metódu považovať za najkonzervatívnejšiu. V porovnaní s plne pravdepodobnostnou metódou bola hodnota únosnosti určená podľa ČSN EN 1992-2 o 21% menšia. V porovnaní s metódami ECOV a PSF bola hodnota únosnosti menšia o 17%.

V ďalšej časti diplomovej práce bola, v porovnaní s bakalárskou prácou, rozvinutá problematika degradácie materiálu. Degradácia materiálu bola rozdelená na dve časti. V prvej časti bol stanovený iniciačný čas kedy betón stratí svoju ochrannú funkciu výstuže pred koróziou. V druhej časti bola modelovaná korózia výstuže. Degradácia materiálu bola určená na základe degradačných modelov z FReETu-D. Betón môže degradovať vplyvom karbonatácie (prenikanie vzdušného CO₂ do konštrukcie) alebo prienikom chloridových iónov (z posypových solí). Modelovanie karbonatácie neukázalo zásadný vplyv na degradáciu betónovej krycej vrstvy výstuže. Naopak pri modelovaní degradácie vplyvom prieniku chloridovej vrstvy bol zistený výraznejší vplyv na degradáciu betónu. Degradácia materiálu určená na základe degradačným modelov z FReETu-D bola porovnaná s výsledkami uvedenými v diagnostickom prieskume, na základe čoho bol stanovený iniciačný čas korózie výstuže na 30 rokov od postavenia konštrukcie. Na základe iniciačného času bola modelovaná korózia výstuže. Korózia výstuže bola modelovaná ako rovnomerný pokles plochy výstuže. Následne bola plocha výstuže upravená v modeli nosníka KA-73 a bol sledovaný pokles únosnosti konštrukcie pre dané časové obdobia. Únosnosť konštrukcie klesala v jednotlivých časových úsekoch, v rozmedzí hodnôt 4-6% pre jednotlivé návrhové metódy.

V poslednej časti diplomovej práce bola skúmaná citlivosť jednotlivých veličín materiálových parametrov na únosnosť a priehyb konštrukcie. Medza klzu predpätej výstuže a pevnosť betónu v tlaku boli určené ako hlavné parametre, ktoré ovplyvňujú únosnosť konštrukcie. Na priehyb konštrukcie mala najväčší vplyv rovnako ako pri únosnosti medza klzu predpätej výstuže a pevnosť betónu v tlaku. Menší vplyv na priehyb konštrukcie bol zaznamenaný pri vlastnej hmotnosti konštrukcie a pri medzi klzu betonárskej ocele.

Pravdepodobnostné metódy v kombinácii s nelineárnou analýzou MKP predstavujú účinný prostriedok pri hodnotení odozvy konštrukcie, pomocou ktorého dostávame reálnu predstavu o správaní sa konštrukcie. Spolu s modelovaním degradácie môžeme získať reálnu predstavu o správaní sa konštrukcie v čase. Pomocou aplikácie uvedenej metodiky, získavaním reálnych hodnôt odozvy konštrukcie, môžeme určiť priority v rekonštrukcii jednotlivých konštrukcií. Na základe toho môžu byť efektívne prerozdelené finančné prostriedky určené k rekonštrukciám konštrukcií. Včasná diagnostika a rekonštrukcia má dôležitý vplyv i na zvýšenie bezpečnosti v cestnej premávke.

Literatúra

- [1] Doležel, J.,: *Modelování spolehlivosti betonových konstrukcí: Odhad zatížitelnosti betonových mostů*. Disertační práce, Vysoké učení technické, Brno, 2016.
- [2] Doležel, J., Novák, L., Novák, D. : IO-Support. Technická zpráva, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, 2015.
URL <http://www.fce.vutbr.cz/stm/lehky.d/io-support/io-support.html>
- [3] Šechný B.: Typový podklad pre konštrukcie cestných a diaľničných mostov z prefabrikátov KA-73 dĺžky 9-12-15-18 m. *Štátny ústav pre projektovanie dopravných stavieb, Dopravoprojekt, Bratislava*, 1973.
- [4] Ředitelství silnic a dálnic: Přehledy z informačního systému o silniční a dálniční síti ČR. [cit. 15-december-2016].
URL <http://www.rsd.cz/wps/portal/>
- [5] Červenka V.,: *Global safety formats in fib Model Code 2010 for design of concrete structures*. In Proceedings of the 11th International Probabilistic Workshop, Brno, 2013.
- [6] Česká technická norma: ČSN EN 1992-1-1 (731201) Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. *Český normalizační institut, Praha*, 2006.
- [7] Joint Committee on Structural Safety: *Probabilistic Model Code, Part 3: Material Properties*,. 2000.
URL http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code.aspx
- [8] Kucek, M.,: *Výpočet životnosti mostnej konštrukcie na základe nelineárnej analýzy a modelovania degradácie*. Diplomová práca, Vysoké učení technické, Brno, 2015.
- [9] Lehký D., Šomodíková M., Doležel J., Novák D.: Pravděpodobnostní analýza zatížitelnosti a spolehlivosti spřaženého mostu z MPD nosníků. *BETON TKS*, ročník 4, 2013: s. 108–113, ISSN 12-133-116.
- [10] Lehký D., Šomodíková M., Doležel J., Novák D.: Pravděpodobnostní analýza zatížitelnosti železobetonového trémového mostu ve vztahu k jeho zbytkové životnosti. *BETON TKS*, ročník 5, 2015: s. 38–43, ISSN 12-133-116.
- [11] Novák D., Teplý B.,: *Spolehlivost stavebních konstrukcí*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o Brno, 1999, ISBN I80-214-1149-X.

- [12] Novák D., Teplý B., Keršner Z., Vořechovský M.: FREET Program Documentation, Part 1, Theory. Technická zpráva, Červenka Consulting, Praha, Česká Republika, 2002.
URL <http://www.freet.cz>
- [13] Pešek, O. : VÝPOČTOVÉ METODY VE STAVEBNICTVÍ. Technická zpráva, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, FAST VUT Brno.
- [14] Pukl R.: Moderní metodika pro stanovení bezpečnosti a spolehlivosti betonových konstrukcí. *BETON TKS*, ročník 4, 2008: s. 74–78, ISSN 12-133-116.
- [15] Rovnaníková, P., Rovnaník, P., Křístek, R. : Stavební chemie, MODUL 3, Degradace stavebních materiálů a chemie kovů. *Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM*, 2005: str. 48, ISBN 80-7204-410-9.
- [16] Slovenská správa ciest: Štatistické prehľady. [cit. 15-december-2016].
URL http://www.cdb.sk/files/documents/cestna-databanka/vystupy-cdb/2016/mosty/kniha_co_mostysts-grafy.pdf
- [17] Suza I. a kolektiv: Diagnostický průzkum levého mostu EV. č. D2-055..2 přes kanál Hakalovská a lesní cestu za Lanžhotem. Technická zpráva, Mostní a silniční, s.r.o., Brno, 2009.
- [18] Technické podmienky TP 224: Ověřování existujících betonových mostů pozemních komunikací. Technická zpráva, Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, Praha, 2010.
- [19] Teplý, B., Chromá, M., Vořechovská, D., Rovnaník, P.: *FReET-D Deterioration Module Program Documentation, Part 1: Theory*. Červenka Consulting, Prague, Czech republic, 2012.
- [20] Vořechovský, M., Červenka, V.: ATENA 2D-Uživatelský manuál. Technická zpráva, Červenka Consulting, Praha, Česká Republika, 2002.

Zoznam použitých veličín, symbolov a skratiek

a – krycia vrstva betónu

$a_{1,2,3}$ – jednotkové množstvo kameniva

c – jednotkové množstvo cementu

d – priemer výstuže

d_{cr} – kritický priemer výstuže

d_i – počiatočný priemer výstuže

e – excentricita tvaru plochy porušenia

$f_E(e)$ – funkcia hustoty pravdepodobnosti účinkov zaťaženia

$f_R(r)$ – funkcia hustoty pravdepodobnosti odolnosti

f_t – pevnosť betónu v ťahu

f_c – pevnosť betónu v tlaku

$f_{y,k}$ – charakteristická ťahová pevnosť ocele

$f_{y,m}$ – stredná hodnota ťahovej pevnosti ocele

f_u – medza pevnosti ocele

$f_{p,y}$ – ťahová pevnosť predpätej ocele

$f_{p,u}$ – pevnosť na medzi únosnosti predpätej ocele

$f_{c,LIM}$ – redukcia pevnosti v tlaku vplyvom trhlín

i_{corr} – prúdová hustota

p_f – teoretická pravdepodobnosť poruchy

l – dĺžka

p – hĺbka jamky

p_{cr} – kritická hĺbka jamky

$r_{c,6}$ – koeficient typu cementu

r_{CO_2} – koeficient koncentrácie

$r_{a,1,2,3}$ – špecifická hmotnosť

r_c – špecifická hmotnosť cementu

s – stupeň bezpečnosti

s_0 – predpísaná hodnota bezpečnosti

s_F – faktor šmykovej pevnosti

s_r – výberová smerodajná odchýlka

s_K – výberová smerodajná odchýlka

t – čas

t_D – návrhová životnosť

t_i – iniciačný čas

t_S – životnosť

t_p – propagačný čas

w – jednotkové množstvo vody

x_c – hĺbka karbonatácie

x_{cl} – hĺbka prieniku chloridovej vrstvy

A_c – plocha výstuže

C – aktuálna koncentrácia chloridov

C_{cr} – kritická koncentrácia chloridov

COV – korelačný koeficient

$C_{S,0}$ – koncentrácia chloridov na povrchu

C_{sat} – koncentrácia chloridov v pevnej fázi

D_{Cl,H_2O} – difúzni koeficient

E – účinok zaťaženia

E_c – modul pružnosti betónu

E_s – modul pružnosti ocele

$F_{p,i}$ – hodnota predpätej sily

G_f – špecifická lomová energia

J_0 – moment zotrvačnosti nosníka KA-73

J_k – moment zotrvačnosti v krútení nosníka KA-73

I_c – moment zotrvačnosti

M_{DIM} – dimenzačný moment

RH – relatívna vlhkosť

R_{corr} – koeficient typu korózie

R – odolnosť

V_x – variačný koeficient

X_m – stredná hodnota

X_k – charakteristická hodnota

X_d – návrhová hodnota

X_{odol} – odolnosť prierezu

X_{zat} – účinky zaťaženia

Z – rezerva spoľahlivosti

α – súčiniteľ teplotnej rozťažnosti

α_R – súčiniteľ citlivosti

β – index spoľahlivosti

γ_R – globálny súčiniteľ spoľahlivosti

δ – dynamický súčiniteľ

σ_{dov} – dovoľené namáhanie

σ_{KRIT} – kritické namáhanie

ρ – vlnná hmotnosť

ω_d – kritická tlaková deformácia

ψ – parameter modelových neistôt